

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE SISTEMAS DE SIMULACIÓN CONTINUA USANDO EL MÉTODO LEEA (LOOP EIGENVALUE ELASTICITY ANALYSIS)

por

Ruben D. Yie Pinedo

Febrero 1, 2013

Proyecto de grado presentado como requisito parcial
para optar al título de
Magister en Ciencias
(Ingeniería Industrial) Universidad
del Norte, Barranquilla
2013

Comité:

Dr. Rene Amaya Mier (Director)

Aprobado por la División de Postgrados e Investigaciones en Ingeniería en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de Magíster en Ingeniería Industrial en área de énfasis en Gestion Industrial.

Ing. René Amaya Mier., Ph. D.

Director del Proyecto

Jurado

Jurado

Barranquilla, Marzo 2013.

Para mi esposa Gina Galindo, por su todo su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos:

A RENÉ AMAYA MIER, por involucrarme en tan gran proyecto y mostrarme la importancia del estudio y la aplicación de la dinámica de sistemas, y sobre todo por la paciencia y amistad que me brindó durante mis años de investigación

A MARCOS SANJUAN, por los consejos académicos que me ayudaron a desarrollar mi proyecto con altos niveles de calidad.

AL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL, Docentes, administrativos, secretarías, asistentes que me ayudaron durante mis estudios. A ellos agradezco hacer de mi estancia en la Universidad una de las mejores experiencias de mi vida.

A LA UNIVERSIDAD DEL NORTE, por prestarme su apoyo; por ayudarme a ser un mejor ser humano; por educarme y enseñarme el valor del conocimiento y la sabiduría, por los recursos físicos y humanos que hicieron posible este gran paso en mi vida.

A todas las personas que de una u otra manera cooperaron y colaboraron en la realización del presente proyecto de grado: mis padres Elizabeth y Ruben, agradecimientos especiales a mi esposa Gina Galindo, por su apoyo moral y académico.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULOS

| | |
|---|----|
| 1. .GENERALIDADES DEL PROYECTO | 1 |
| 1.1. TÍTULO DEL PROYECTO | 1 |
| 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.2.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2.2. Formulación del Problema | 2 |
| 1.2.3. Justificación | 3 |
| 1.2.4. Contribucion | 5 |
| 1.3. OBJETIVOS | 6 |
| 1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES | 6 |
| 1.5. HIPÓTESIS Y DISEÑO METODOLÓGICO | 8 |
| 1.5.1. Hipótesis | 8 |
| 1.5.2. Diseño Metodológico | 8 |
| 2. .MARCO TEÓRICO | 9 |
| 2.1. DINÁMICA DE SISTEMAS | 9 |
| 2.2. AMPLIFICACIÓN DE LA DEMANDA | 10 |
| 2.3. LOOP EIGENVALUE ELASTICITY ANALYSIS (LEEA) | 11 |
| 3. .DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL | 32 |
| 3.1. MATRIZ DE ADYACENCIA | 33 |
| 3.2. MATRIZ DE ACCESIBILIDAD | 33 |
| 3.3. PATHWAYS Y ARCOS CAUSALES | 34 |
| 3.4. PARTICIONES DE NIVEL | 38 |
| 3.5. PARTICIONES CÍCLICAS | 40 |
| 3.6. SILS | 41 |
| 3.7. MATRIZ DE GANANCIAS | 42 |
| 3.8. MATRICES DIRECTIVAS DE PATHWAYS Y SILS | 45 |
| 3.9. ELASTICIDAD DE LOS ARCOS COMPACTOS DE GANANCIA | 46 |
| 3.10. ELASTICIDAD DE LOS ARCOS CAUSALES | 47 |
| 4. .PRUEBA DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL | 49 |

| | |
|---|-----|
| 4.1. MODELO PREDADOR-PRESA | 49 |
| 4.2. MODELO LINEAL DE INVENTARIO | 55 |
| 4.3. MODELO DE CASO DE CADENA DE SUMINISTRO | 60 |
| 5. .VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA | 63 |
| 5.1. MODELO PREDADOR PRESA | 64 |
| 5.2. MODELO LINEAL DE INVENTARIOS | 66 |
| 6. .CONCLUSIONES | 68 |
| APÉNDICES | 71 |
| A. .DEFINICIONES IMPORTANTES | 72 |
| B. .RESULTADOS MODELO DE CASO DE CADENA DE SUMI- NISTROS | 74 |
| B.1. PATHWAYS | 74 |
| B.2. VICULOS CAUSALES | 129 |
| B.3. SILS | 142 |
| C. .DATOS DE LA VALIDACIÓN | 146 |
| C.1. MODELO PREDADOR PRESA | 146 |
| C.2. MODELO LINEAL DE INVENTARIOS | 147 |
| BIBLIOGRAFÍA | 150 |

LISTA DE FIGURAS

Figura

| | | |
|-------|--|-----|
| 2.1. | Ampliacion de la Demanda | 10 |
| 2.2. | Modelo Poblacional | 13 |
| 2.3. | Grafo Ilustrativo | 16 |
| 2.4. | Matriz de Adyacencia Modelo Poblacional | 16 |
| 2.5. | Matriz de Accesibilidad | 17 |
| 2.6. | Matriz D | 20 |
| 2.7. | Matriz de Longitud | 20 |
| 2.8. | Estructura de la Matriz de Ganancia | 24 |
| 2.9. | Modos Elementales de Comportamiento | 25 |
| 3.1. | Diagrama de Flujo | 32 |
| 3.2. | Grafo Ilustrativo | 35 |
| 3.3. | Matriz de Ganancias | 43 |
| 4.1. | Modelo Predador - Presa | 50 |
| 4.2. | Comportamiento de la Variable Prey en el Modelo P-P | 52 |
| 4.3. | Comportamiento de los Eigenvalores | 53 |
| 4.4. | Elasticidad de los Eigenvalores | 53 |
| 4.5. | Elasticidad del Modelo | 54 |
| 4.6. | Modelo Lineal de Inventarios | 55 |
| 4.7. | Comportamiento de la Variable Inventory | 58 |
| 4.8. | Comportamiento de los Eigenvalores | 59 |
| 4.9. | Elasticidad de los Eigenvalores | 59 |
| 4.10. | Elasticidad del Modelo Lineal de Inventarios | 60 |
| 4.11. | Comportamiento de la Parte Real de los Valores Propios | 61 |
| 4.12. | Comportamiento de la Parte Imaginaria de los Valores Propios | 61 |
| 4.13. | Parte Real de la Elasticidad | 62 |
| 4.14. | Parte Imaginaria de la Elasticidad | 62 |
| 5.1. | Diagrama de Flujo para Validación de la Herramienta | 64 |
| 5.2. | Modelo Predador-Presa para Validacion | 64 |
| 5.3. | Validación de la Variable G11 | 65 |
| C.1. | Validación G ₁₁ | 146 |
| C.2. | Validación G ₁₂ | 146 |
| C.3. | Validación G ₂₁ | 147 |
| C.4. | Validación G ₂₂ | 147 |
| C.5. | Validación G ₁₁ | 148 |
| C.6. | Validación G ₂₂ | 148 |
| C.7. | Validación G ₂₃ | 148 |

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| C.8. | Validaci3n G_{31} | 149 |
| C.9. | Validaci3n G_{32} | 149 |
| C.10. | Validaci3n G_{22} | 149 |

LISTA DE TABLAS

Tabla

| | | |
|------|---|----|
| 5.1. | Validación Modelo Predador Presa | 66 |
| 5.2. | Validación Modelo Lineal de Inventarios | 67 |

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1. | Pseudocódigo para Encontrar la Matriz de Adyacencia | 33 |
| 3.2. | Pseudocódigo para Encontrar la Matriz de Accesibilidad | 34 |
| 3.3. | Pseudocódigo para Encontrar los Pathways del Sistema | 37 |
| 3.4. | Pseudocódigo para Encontrar los Vínculos Causales | 38 |
| 3.5. | Pseudocódigo para Encontrar las Particiones de Nivel | 39 |
| 3.6. | Pseudocódigo para Encontrar Particiones Cíclicas | 40 |
| 3.7. | Pseudocódigo para Encontrar los Ciclos del SILS | 42 |
| 3.8. | Pseudocódigo para Encontrar la Matriz de Ganancias | 45 |
| 3.9. | Pseudocódigo para Encontrar la Matriz DMP | 46 |
| 3.10. | Pseudocódigo para Encontrar la Matriz DPS | 46 |
| 3.11. | Pseudocódigo para Encontrar la Elasticidad de los Arcos Compactos . . | 47 |
| 3.12. | Pseudocódigo para Encontrar la Elasticidad de los Arcos Causales . . . | 48 |

INTRODUCCIÓN

La simulación ha surgido como una herramienta que ayuda al analista a detectar los factores que mayor influencia tienen sobre una variable de respuesta de interés. En efecto, en la literatura, hay disponibles innumerables modelos de simulación que facilitan esta tarea. La simulación tiene la ventaja de basarse en métodos computacionales que de manera eficaz pueden reflejar los cambios que puede experimentar una variable ante cambios en los factores del sistema. El uso de la simulación de modelos es preferible cuando el problema estudiado tiene una complejidad matemática que dificulta la modelación matemática del mismo, o que resultan en modelos no lineales altamente complejos a los cuales no se les podrá aplicar métodos de optimización exactos para obtener resultados.

Como contraparte, la simulación por sí sola puede ayudarnos a encontrar una relación matemática entre las variables de salida y las variables de entrada del modelo. Pero raramente el análisis de un modelo se limita a este resultado. Los efectos de las variables intermedias, la interacción de variables, efectos de los ciclos de retroalimentación, etc. son efectos de interés para los analistas, para poder tener un conocimiento más profundo y preciso del comportamiento detallado del modelo. Este análisis detallado puede ser llevado a cabo por medio de múltiples simulaciones del modelo y analizando cada factor y cada interacción por separado. Se debe tener en cuenta, que el número de dichos experimentos es de orden exponencial en el número de variables del sistema. Afortunadamente para los investigadores, el encontrar estos efectos con el uso de fuerza bruta no es la única opción disponible, ya que diversos métodos de análisis de sensibilidad están disponibles para este fin. La no linealidad en los modelos de simulación supone una barrera para encontrar métodos eficaces de análisis de sensibilidad. El método LEEA propone una linealización del modelo para poder analizar el comportamiento de sus valores y vectores

propios para así determinar los factores mas significativos del sistema. En el presente trabajo, se busca desarrollar una herramienta computacional que aplique el algoritmo del LEEA de manera automática con mínima participación del usuario. La automatización del LEEA presenta varios retos para el programador, siendo uno de los mas importantes, el uso de un software que pueda realizar de manera automática operaciones matematicas avanzadas, como encontrar los valores propios de una matriz y encontrar derivadas de funciones altamente complejas.

El método LEEA tiene una dependencia absoluta de la derivación de su matriz de ganancias. El uso de la palabra absoluta puede parecer excesivo, pero significa que de no poder encontrarse las derivadas de dicha matriz, el método LEEA no puede ser aplicado. Esta limitación puede entenderse de la siguiente manera: Los modelos a ser analizados deben ser derivables a lo largo de sus pathways. A lo largo del documento se explicará con detalle que son los pathways del sistema. Por ahora solo basta saber que son un camino que conecta las variables de estado del sistema y que ser utilizado como fundamento para encontrar la matriz de ganancias del mismo. A simple vista esta limitacion no tiene graves implicaciones, pero significa que el uso de tablas y funciones especiales queda prohibido en la modelacion.

Otro problema relacionado a la derivación es encontrar la ecuación que debe ser derivada. Una vez los pathways son encontrados, generar la matriz de ganancias no representa mayor problema. Pero la ecuación resultante puede ser una cadena de caracteres extremadamente larga, dependiendo del tamaño del modelo. Aparentemente este problema no es de gran importancia, pero las herramientas matemáticas computacionales disponibles tienen un límite en el tamaño de las cadenas que pueden ser procesadas.

Es importante aclarar que el método LEEA no necesita las ecuaciones resultantes, sino los valores de dichas ecuaciones en el tiempo. Esta característica del LEEA nos da gran flexibilidad ya que podríamos obtener dichos valores por medio de métodos diferentes a la derivación tradicional. Debido a esto, se decidió utilizar el método de aproximación numérica de la derivada, que consiste en linealizar la funcion a derivar en un rango pequeño y encontrar la pendiente de la línea recta resultante. El uso de dicho método

elimina la necesidad de encontrar las ecuaciones de la matriz de ganancias, y sobre todo la necesidad de encontrar la derivada de la misma. Por otra parte el método propuesto no sufre debido a la continuidad de las ecuaciones a lo largo de los pathways, eliminando así los dos principales problemas que se presentaron al comienzo de la investigación.

Otra parte importante del método LEEA es la obtención de los pathways y vínculos causales del modelo, necesarios para encontrar el SILS del modelo (el significado del SILS será posteriormente explicado en detalle). Hasta el momento los pathways y vínculos causales han sido obtenidos de manera manual por los mismos modeladores y expertos en cada modelo específico. Nuestra herramienta encuentra estos parámetros (entre otros) de manera automática, lo que significa que ningún conocimiento previo sobre el comportamiento del modelo es requerido para su análisis. En conclusión nuestra herramienta computacional toma un modelo de simulación como entrada y aplica el método LEEA sin ninguna intervención significativa del usuario. Este solo debe escoger la variable de estado de interés. Es importante resaltar que la herramienta diseñada no realiza ninguna toma de decisiones y esta limitación es heredada del LEEA.

En el capítulo 1, se muestran las generalidades de la investigación y se habla en detalle de los alcances y limitaciones de la herramienta. El capítulo 2 contiene la información necesaria para poder entender el método LEEA y la necesidad del mismo. Este marco teórico representa uno de los grandes aportes de esta investigación, ya que durante el desarrollo de la misma encontramos que la información sobre el tema es bastante escasa. La mayor parte de la información disponible requiere de un alto nivel de conocimiento en el tema. Además, la información de bajo nivel (definiciones, ecuaciones, teoremas, etc.) necesaria, es bastante escasa y se encuentra de manera dispersa. Este capítulo representa una síntesis de esa información. Los capítulos 3, 4, y 5 contienen toda la información técnica, de cómo se realizó la herramienta, los algoritmos utilizados, las pruebas realizadas y la validación de la herramienta. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de nuestra investigación.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. TÍTULO DEL PROYECTO

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE SISTEMAS DE SIMULACIÓN CONTINÚA USANDO EL MÉTODO LEEA (LOOP EIGENVALUES ELASTICITY ANALISYS)

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. Antecedentes

Uno de los pilares sobre los cuales se desarrolla el presente trabajo es la dinamica de sistemas. La dinámica de sistemas surgió en la década de los años 60, como respuesta a la importancia del enfoque sistémico para controlar las relaciones complejas que resultan de la interacción hombre-maquina. Sin embargo, desde su creación ha sido aplicada para el estudio de innumerables sistemas de diversas áreas de la ciencia. Es así como ha sido utilizada para el análisis de sistemas dinámicos astronómicos que presentan retroalimentación; en la dinámica urbana, desarrollada por Forrester (1969), en la cual se presenta una herramienta auxiliar para la planificación urbana y regional; en sistemas sociológicos en donde se han modelado desde aspectos teóricos, como la dinámica social de Pareto y/o Marx (Forrester et al., 1976), hasta cuestiones de implantación de justicia (García, 2000).

Otro de los aspectos en los que ha sido utilizada la Dinámica de sistemas es en el estudio de los sistemas de producción. De hecho, Forrester utiliza el enfoque de Dinámica de Sistemas para el estudio de uno de los problemas principales que se presentan en este tipo de sistemas el cual consiste en el fenómeno de amplificación de la demanda y por ello este fenómeno pasó a ser denominado efecto Forrester (Forrester, 1969).

Al igual que la Dinámica de sistemas, el Análisis de sensibilidad ha sido utilizado en diversos campos del conocimiento, tales como sistemas sociales, económicos (Forrester et al., 1976), políticos, astronómicos (Katime y Hernández, 2005), agropecuarios, químicos, de calidad (Moskowitz y Tang, 1992), etc. Uno de los análisis de sensibilidad que incluyen la dinámica de sistemas es el LEEA.

Los estudios disponibles en la literatura acerca de aplicaciones del LEEA no son numerosos, a pesar de que esta metodología fue creada a comienzos de la década de los 80 por Forrester (Forrester et al., 1976); es decir, hace más de 20 años. Entre los principales investigadores del LEEA se encuentra Christian Erik Kampmann, quien logró transformar el sistema de ecuaciones no factible propuesto anteriormente por Forrester en un sistema con solución factible, al abstraer de todo el sistema de loops un subconjunto de loops independiente (ILS) de forma que se simplificara el problema tratado (Kampmann, 1996). Así mismo, Kampmann desarrolló conjuntamente con Rogelio Oliva un conjunto de aplicaciones del LEEA en tres modelos diferentes con el fin de constatar las debilidades y virtudes de la metodología (Kampmann y Oliva, 2006).

1.2.2. Formulación del Problema

El presente trabajo propende por el desarrollo de un análisis de sensibilidad relacionado con el fenómeno de amplificación de demanda en una cadena genérica de suministro. A partir del estudio de un modelo de simulación por computador, fundamentado en la metodología de Dinámica de Sistemas, se busca la representación de escenarios de operaciones de flujo de materiales e información entre diferentes instancias empresariales. Asimismo, se busca la acertada identificación de las variables estructurales más importantes

que promueven la existencia del fenómeno de amplificación de demanda en la cadena de suministro analizada.

El problema en dicha formulación es principalmente la complejidad matemática asociada a dicho análisis de sensibilidad, debido a la complejidad del sistema y sus ecuaciones asociadas. Por lo tanto, una rama de la dinámica de sistemas y sistemas logísticos está enfocando esfuerzos en el estudio, desarrollo y análisis de métodos de análisis que procedan con el uso de aproximaciones lineales del sistema. Como fue mencionado anteriormente, nos enfocaremos en uno de estos métodos conocido como el LEEA.

El principal problema con el LEEA radica en que actualmente el proceso es ejecutado de forma manual. Es decir que para realizar un análisis por medio del LEEA hay que hacer desarrollo matemático y computacional de manera personalizada para cada problema o sistema a estudiar, introduciendo otra fuente de error al momento de hacer validaciones sobre un modelo. La finalidad de este proyecto radica en realizar un software genérico y autónomo que realice este análisis por medio de algoritmos de complejidad polinomial dependiente del número de variables en el sistema.

1.2.3. Justificación

El problema de amplificación de demanda (también conocido como bullwhip effect, o efecto de látigo) corresponde con el fenómeno observable en cadenas de suministro de una mayor y creciente variación de los pedidos colocados a los proveedores de una empresa en relación a la variación de pedidos percibida por sus clientes (Forrester, 1969). En otras palabras, al incremento de la distorsión de la demanda de productos observada entre los componentes de una cadena de suministro en la medida en que se aleja de los puntos de consumo y se extiende hacia los puntos de abastecimiento. Esto incluye típicamente pobres esquemas de comunicación y acercamiento entre eslabones, desconfianza en relaciones cliente-vendedor, largos tiempos de procesamiento y distribución, agrupamiento de pedidos en lotes por economías de escala, políticas de pronósticos y planificación de pedidos independientes y políticas comerciales de descuentos.

Como consecuencia de la anterior distorsión, es natural un aumento de la descoordinación de actividades al interior del sistema de suministro debido a un esfuerzo de planificación que responde a una demanda irreal. Esto típicamente se traduce en la presencia de desperdicios en el sistema, tanto por excesos (p.e., bajas rotaciones de material, horas extras de procesamiento) como también defectos (p.e., ventas perdidas, faltantes, necesidad de expeditación de materias primas, re-planificación de producción). Con el fin de realizar una cuantificación de este problema, McCullen y Towill (2002) realizan una estimación del costo a ser generado tanto por problemas de exceso como por problemas de defectos.

Parte importante del estudio del bullwhip effect es el análisis de sensibilidad el cual consiste en el estudio de los efectos de las variaciones de los parámetros de un sistema en el comportamiento del mismo, debido a que este permite conocer la precisión exigida a cada parámetro del sistema con el fin de garantizar que las conclusiones extraídas de los modelos sean correspondientes con la realidad del sistema. Además, el análisis de sensibilidad permite decidir cuáles son los parámetros que tienen mayor influencia en el comportamiento del sistema, y, por lo tanto, sobre los que se debe actuar en la realidad para obtener un determinado efecto en el comportamiento del mismo.

Para realizar el análisis de sensibilidad de un sistema existen dos métodos: simulaciones sucesivas y aplicación de técnicas analíticas (Aracil and Gordillo, 1994). En el presente proyecto se pretende utilizar la segunda de las metodologías antes mencionadas (LEEA) debido a que este método conduce a realizar el análisis de forma más robusta que con el método de simulaciones sucesivas. Actualmente, no se cuenta con herramientas computacionales que permitan realizar un análisis completo por medio del LEEA. Por lo tanto la realización de este análisis bajo las condiciones actuales requiere una gran cantidad de tiempo y de la realización de varias operaciones computacionales individuales.

Los resultados de este estudio permitirán realizar un análisis de sensibilidad por medio del método LEEA de una manera más automatizada y eficiente, que permita la obtención de resultados de forma más rápida y oportuna, de tal forma que las organizaciones tengan

una mayor flexibilidad en la toma de decisiones relacionadas con aquellas operaciones que se ven afectadas por el bullwhip effect.

1.2.4. Contribucion

En la actualidad el método LEEA debe ser aplicado de manera semiautomática, esto quiere decir que algunos pasos en la aplicación del método pueden ser codificados para ser usados en cualquier modelo de manera automática. Por otra parte, algunos pasos como el computo de las elasticidades, deben ser programados para cada modelo en particular y finalmente algunos pasos deben ser encontrados de manera manual, como por ejemplo el encontrar las ecuaciones de ganancia pathways. Nuestro proyecto encuentra la manera de reutilizar los algoritmos usados previamente por otros autores, así como de generar algoritmos generalizados para las etapas que hasta el momento ha sido realizadas de manera manual. De esta manera el software diseñado puede de manera automática aplicar el método LEEA a un modelo de simulación sin necesidad del uso de algoritmos específicos para el modelo, así como tampoco de un análisis previo del mismo. Adicionalmente a la determinación de las elasticidades de los valores propios del sistema, el software entrega al usuario un listado de los siguientes parametros:

- Vínculos Causales
- Pathways
- Matriz de Ganancia (valores e integral de la ecuación)
- Ganancia de los pathways (valores e integral de la ecuación)
- Matriz de adyacencia
- Matriz de accesibilidad

Estos datos pueden ser usados a discreción del usuario para la aplicación de algún método diferente del LEEA o para realizar un análisis manual sobre el modelo. Estos parámetros son encontrados de manera automática y general, por lo que el usuario no tendría que realizar ningún tipo de análisis previo o programación para conseguirlos.

1.3. OBJETIVOS

Generar una herramienta computacional integral que permita realizar un analisis de sensibilidad de un modelo de simulación de Dinamica de Sistemas, a través del estudio de los valores y vectores propios del modelo dinamico linealizado. Para ello, es menester alcanzar gradualmente una serie de objetivos mas específicos como son:

- Definir consideraciones de diseño (tecnologías a utilizar, métodos de empalmes entre tecnologías, heurísticas, métodos matematicos, métodos estadísticos, etc.) que permitan la mayor eficiencia y autonomía de la herramienta computacional.
- Desarrollar casos conceptuales de estudio sobre modelos dinamicos diversos y su analisis a través del método LEEA. En particular, aplicar el método al modelado de la amplificación de la demanda en una cadena de suministro.
- Validar los resultados obtenidos a partir de la herramienta diseñada y comparar su desempeño relativo frente a anteriores aplicaciones desarrolladas con similar proposito
- Sistematizar el método LEEA en una herramienta computacional integrada que interconecte las herramientas computacionales existentes del ámbito de Dinamica de sistemas con las herramientas de analisis matemático

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES

Se contemplan como puntos fundamentales del proyecto en mencion:

- Desarrollar una herramienta computacional que permita realizar un analisis de sensibilidad de la amplificacion de la demanda en un modelo de simulacion previamente validado. La herramienta a diseñar se basar en el método Loop Eigenvalue Elasticity Analysis (LEEA).

- Implementar el estado del arte en métodos de análisis de sensibilidad aplicados a modelos de simulación, dirigidos a la identificación de puntos críticos de generación de amplificación de demanda.
- Proponer y documentar medidas específicas de mejoramiento dirigidas hacia la reducción del fenómeno de amplificación de demanda.

El desarrollo de los modelos de simulación que serán analizados por medio de la herramienta a diseñar no es un objetivo del presente proyecto. Por lo tanto, se utilizarán modelos previamente desarrollados y validados con el fin de establecer la confiabilidad de los resultados arrojados por la herramienta diseñada. A continuación se enlistan puntos específicos considerados dentro de la funcionalidad de la herramienta:

- El sistema encuentra de manera autónoma todos los SILS, los pathways, los arcos causales, la matriz de ganancia, la ganancia de los pathways, y todas las elasticidades del sistema.
- El sistema no toma decisiones por sí mismo, sino que constituye una herramienta para la toma de decisiones.
- La salida de la herramienta diseñada entrega un arreglo de datos en MatLab, para ser utilizado a disposición del experto.
- La herramienta diseñada sólo requiere como datos de entrada un sistema codificado en VENSIM y las indicaciones del usuario respecto a la variable de interés.

La herramienta es capaz de encontrar una aproximación de las derivadas de las ecuaciones en la matriz de ganancias y ganancia de los pathways. Dicha aproximación es utilizada para evitar el cálculo de derivadas complejas (ecuaciones con un gran número de discontinuidades), así como para poder realizar el análisis de modelos que contengan funciones no derivables, como series de datos y funciones lógicas.

1.5. HIPÓTESIS Y DISEÑO METODOLÓGICO

1.5.1. Hipótesis

Es posible desarrollar un prototipo funcional de una herramienta computacional para la aplicación automatizada del algoritmo LEEA. La herramienta puede ser aplicada a diversos sistemas dinámicos y el análisis provisto por dicha herramienta puede ayudar a la toma de decisiones tácticas y estratégicas, en procura del mejoramiento del sistema en estudio.

1.5.2. Diseño Metodológico

Tipo de Estudio: De acuerdo con los objetivos e hipótesis planteados, así como teniendo en cuenta el nivel de conocimiento que se pretende alcanzar, esta investigación se puede considerar de tipo exploratorio. Exploratorio porque aún no se ha generado una herramienta computacional que integre toda la metodología del LEEA. El estudio exploratorio permite entonces formular el problema, para hacer posible los otros niveles de investigación.

Las fuentes de información principales para esta investigación son primarias, dentro de las que se tiene libros, proyectos de grado anteriores, artículos de revistas impresas o publicadas en Internet y trabajos presentados en conferencias. Finalmente, las fuentes secundarias incluyen citaciones de autores y recopilaciones bibliográficas. Tanto en este caso como en el de las fuentes primarias, la información se obtuvo a través de observación simple.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. DINÁMICA DE SISTEMAS

El término Dinamica de Sistemas se refiere al método que permite transcribir la descripción elemental de un sistema a un sistema dinámico. De este modo, para el estudio de un sistema específico se construye un objeto formal, es decir, un sistema dinamico en el sentido matematico del término y con el que se obtiene un modelo de la realidad que se desea analizar. Como sistema dinámico se entiende el objeto matematico formado por un espacio de estados X y una regla que prescribe cómo varían estos estados a lo largo del tiempo. De este modo el sistema dinamico aporta el lenguaje para la descripción del comportamiento de un sistema (Aracil y Gordillo, 1994).

La Dinámica de Sistemas aplica básicamente las ideas de retroalimentacion y sistema dinamico, junto con la teoría de modelos en el espacio de estados y procedimientos de analisis numérico. En la Dinamica de Sistemas se plantean dos aspectos clave, enunciados a continuacion.

El primer aspecto clave está relacionado con el proceso de cuantificacion. De hecho, el primer paso en la Dinamica de Sistemas consiste en identificar las variables de interés y las relaciones entre las mismas. A continuacion es imprescindible cuantificar dichas relaciones, lo que en ocasiones plantea serias dificultades.

El segundo aspecto a destacar es el concerniente con la validacion, ya que una vez construido el modelo hay que verificar si refleja la realidad del sistema simulado. Esto puede solventarse de varias formas, por ejemplo, utilizando informaciones cuantitativas

de la evolución del sistema real en el pasado. Si el modelo es capaz de generar los comportamientos característicos del sistema real, entonces se obtiene confianza en la validez del modelo.

En Dinámica de Sistemas se obtienen trayectorias para las variables incluidas mediante la aplicación de técnicas de integración numérica y simulación. Es importante tener en cuenta que dichas trayectorias no deben ser interpretadas como predicciones, sino como proyecciones o tendencias. El objetivo final de los modelos de Dinámica de Sistemas es poder conocer y comprender la estructura y comportamiento del sistema real. Esta comprensión busca generar un marco que permita establecer acciones encaminadas a mejorar el funcionamiento del sistema o resolver los problemas detectados (<http://www.daedalus.es>, 2004).

2.2. AMPLIFICACIÓN DE LA DEMANDA

El problema de la amplificación de la demanda fue detectado gracias a que algunas empresas han observado que mientras que para algunos productos la demanda es relativamente estable, el inventario, faltantes y pedidos emergentes tiende a incrementarse y a oscilar a través del sistema de suministro (Kam, 2000). Los orígenes de este fenómeno se encuentran primordialmente en características estructurales de las cadenas de suministro (Forrester, 1969) y han sido ampliamente estudiados por diversos autores.



Figura 2.1: Ampliación de la Demanda

Forrester concluye que aquellos sistemas complejos en los cuales intervienen fuerzas e intereses de orígenes diversos presentan un dinamismo generador de errores, inexactitudes y volatilidad en la información que no puede ser analizado únicamente desde una pers-

pectiva administrativa unilateral, requiere ser observado en su totalidad con un enfoque sistémico (Forrester, 1969).

En los años 90 los ejecutivos de Procter & Gamble observaron que, a pesar que la demanda de pañales era estable en el mercado, la demanda que presentaban sus distribuidores tenía fuertes variaciones entre períodos, dando como resultado exceso o falta de inventarios a lo largo de la cadena, malos pronósticos, capacidad insuficiente o excesiva, con niveles bajos de servicio al cliente y altos costos generales para el sistema. Ellos le dieron el nombre de Bullwhip Effect (Gigola, 2001).

Para poder conocer y comprender el Bullwhip Effect es importante estar en capacidad de identificar cuáles son los parámetros a lo largo del sistema que contribuyen en mayor proporción al fenómeno de amplificación de la demanda. Para ello se utiliza el método de Análisis de Sensibilidad. Con este se busca estudiar la sensibilidad del modelo a cambios que pueden ser producidos en sus parámetros o en sus condiciones iniciales. Con esto, no solo se obtiene una mayor comprensión del comportamiento del modelo, sino que también se obtiene una mejor idea acerca de la validez y la utilidad del mismo.

2.3. LOOP EIGENVALUE ELASTICITY ANALYSIS (LEEA)

El Análisis de Sensibilidad se puede realizar por medio del método de simulaciones sucesivas, que consiste en la variación manual de los parámetros del sistema y su simulación asociada a cada variación. De cada simulación se obtienen resultados independientes y estos son analizados para obtener una medición del impacto de los parámetros modificados dentro del sistema.

Por otra parte, se puede obtener un Análisis de Sensibilidad menos intuitivo usando el método de linealización. Este último es un método analítico para el estudio del sistema, el cual permite llegar a un algoritmo con el que se obtienen trayectorias de los cambios que se producen en las variables de estado debido a variaciones pequeñas y constantes en los parámetros y en las condiciones iniciales (Aracil and Gordillo, 1994).

Uno de los métodos analíticos de Análisis de Sensibilidad es el Loop Eigenvalue Elasticity Analysis (LEEA), el cual parte del EEA (Eigenvalue Elasticity Analysis) que consiste

en la aplicación de un Análisis de Sensibilidad enfocado en cuantificar la elasticidad (el concepto de elasticidad está asociado con la sensibilidad del modelo respecto a los valores y vectores propios. Para más detalles, ver la sección 2.3) de los valores propios (o eigenvalores) calculados para el modelo analizado. Cada parámetro tiene asociado un valor propio el cual representa la proporción con la que cada variable de estado impacta en el comportamiento de un modelo linealizado. Debido a la linealización del modelo, los eigenvalores son una medida del efecto que tendría la variación de cada elemento del sistema sobre las variables de respuesta estudiadas. En el caso del LEEA, dichas variables de respuesta están asociadas a los loops o lazos de retroalimentación del sistema (Aracil and Gordillo, 1994).

Como se mencionó previamente, no son numerosos los estudios disponibles en la literatura acerca de aplicaciones del LEEA, siendo los principales investigadores Forrester Kampmann, Oliva, Gneralp y Saleh (ver respectivamente Forrester (1969); Kampmann (1996); Oliva (2004); Kampmann and Oliva (2006); Güneralp (2006); Saleh and David- sen (2000)). Burak Gneralp ha propuesto una metodología basada en 10 pasos, para la implementación del LEEA. Los diez pasos propuestos por Güneralp, serán los diez pilares sobre los cuales se desarrollará el trabajo investigativo propuesto. En la siguiente sección se describen las participaciones específicas de cada uno de dichos pasos dentro de nuestra metodología.

Metodología para la implementación del LEEA

A continuación, se procederá a describir cada uno de los pasos que conforman la metodología para la aplicación del LEEA propuesta por Güneralp (2006).

Paso #1 Identificación de la estructura del modelo

Para la aplicación del LEEA, es necesario como primera medida identificar todos los nodos del modelo (excepto las constantes y las tablas de funciones), incluyendo las variables de estado. Igualmente, se podría seleccionar la variable de estado a ser analizada.

Paso #2 Arcos causales y pathways

Una vez se hayan identificado todos los nodos o variables del modelo, se procede a identificar todos los arcos causales y pathways del modelo, excepto los arcos causales en los que haya involucradas constantes o vínculos flujo-repositorio (flow-to-stock). La importancia de la identificación de los arcos se refleja en el posterior cálculo de las elasticidades de cada arco, la cual es igual a la suma de las elasticidades de todos aquellos loops en los cuales participe el arco en cuestión. Los pathways, por su parte, son caminos definidos por arcos que vinculan a las variables de estado entre sí, incluso con ellas mismas. Un pathway puede contener más de un arco causal y un arco causal puede estar en más de un pathway. La identificación de los pathways permitir relacionar las elasticidades que sean calculadas mediante el análisis de eigenvalores con las elasticidades de los arcos causales.

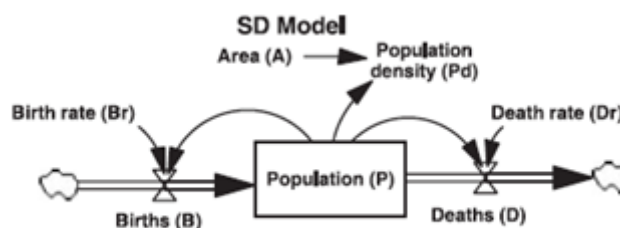


Figura 2.2: Modelo Poblacional

Fuente: (Oliva, 2004)

Tomese por ejemplo, el modelo anterior tomado de Oliva (2004). Los dos primeros pasos, descritos hasta el momento, consistirían en identificar todos los nodos, exceptuando las constantes, con lo que tendríamos los siguientes nodos: Br, A, P d, Dr, D, B y A; donde P es la variable de estado. Los arcos causales serían todos los arcos que no involucren constantes ni vínculos flujo-repositorio. Si se establece que los nodos A, Br y Dr son parametros o constantes, entonces los arcos causales serían P a D, P a B y P a P d. Los pathways serían $P \rightarrow B \rightarrow P$, y $P \rightarrow D \rightarrow P$.

Paso #3 Shortest Independent Loop Set (SILS)

Dado que el LEEA constituye un análisis sobre las elasticidades de eigenvalores asociados a determinados ciclos de retroalimentación o loops del modelo, es necesario identificar aquellos loops que sirvan como base para el estudio.

Aunque trabajar con todos los loops del modelo no sería incorrecto, sí sería poco conveniente, en especial en los casos en que el modelo analizado sea bastante complejo, lo cual no es nada extraño dentro de la Dinámica de Sistemas. Por lo tanto, en vez de tener en cuenta todos los loops, la idea es seleccionar aquellos que más impacten el comportamiento de las variables de interés para enfocar el análisis en ellos y obviar los demás. Este procedimiento se apoya en los estudios realizados previamente por Kampmann and Oliva (2006). En este respecto Kampmann (1996) creó el ILS (Independent Shortest Path) como una manera de manejar la complejidad de los ciclos de un modelo. Luego, Oliva (2004) propuso una manera de identificar un ILS basado en los loops con el menor número de arcos posible, y de organizar el ILS de una manera que hiciera más sencillo el entendimiento de las relaciones de los loops.

En efecto, uno de los mayores aportes de Kampmann fue la creación de un algoritmo para la generación de un conjunto de loops independientes para un modelo específico. Dos loops serán independientes entre sí, si tienen por lo menos un arco no en común.

Sin embargo, el método propuesto por Kampmann en cuanto a la formación de ILS no garantizaba la inclusión de los ciclos más cortos o ciclos geodésicos. Entiéndase por ciclo geodésico aquel que conecta dos vértices cualesquiera que pertenezcan a un mismo loop, mediante el menor número de arcos posible; en otras palabras, el ciclo de menor longitud que conecta un vértice i con un vértice j que están dentro de un mismo loop. Por lo tanto, el algoritmo de Kampmann no simplificaba al máximo el problema y dejaba una puerta abierta para la mejora del mismo.

Fue así como surgió en Oliva la idea de un nuevo algoritmo que generara lo que se conoce como SILS (Shortest Independent Loop Set), el cual no es más que un ILS conformado sólo por ciclos geodésicos (Oliva, 2004). El objetivo final es el de construir una ecuación o sistema de ecuaciones lo más sencillo posible con fines de estimación. Para ello, se deben identificar el mínimo de ecuaciones y conjuntos de parámetros que están involucrados en el cómputo de una variable de respuesta a partir de

entradas conocida. No se deben considerar aquellos parámetros y ecuaciones de baja significancia que no participan de forma directa en dicho cómputo y que lo único que harían sería aumentar la complejidad del mismo. A continuación se describe la metodología completa para la generación del SILS.

Construcción del SILS: Una vez se ha identificado el sistema que se desea estudiar, se procede a realizar un grafo dirigido del mismo, el cual permita visualizar de una manera sencilla las relaciones que existen entre las diferentes variables del sistema. Este grafo es un conjunto de nodos o vértices que representan a las variables y parámetros del sistema, integrado con un conjunto de arcos dirigidos que representan las relaciones de causa y efecto que existen entre ellos. Por lo tanto en todo grafo se pueden distinguir dos tipos de conjuntos finitos: el conjunto $V(G)$ contendr todos los vértices o nodos del sistema y el conjunto $E(G)$ que contendrá los arcos como un valor binario entre cada par ordenado del conjunto $V(G)$. La relacion o arco entre i y j tendr valor de 1 si y sólo si i tiene participacion en el computo de j . Oliva llama esta relacion como i es usado en j .

Para facilitar las operaciones computacionales, el grafo se representa de forma matricial en lo que se conoce como una Matriz de Adyacencia. Dicha matriz es binaria y cuadrada, con un tamaño igual al número de variables en el sistema. Cada celda a_{ij} tendr un valor de 1 o cero, y será igual a uno si y sólo si el nodo i incide de forma inmediata en el comportamiento del nodo j , o lo que es lo mismo, si el arco ij existe (o sea que pertenece al conjunto $E(G)$). En la matriz de adyacencia se tendr que la i —ésima fila contendr 1's en las columnas correspondientes a los sucesores de i ($Succ[i]$), es decir, los nodos directamente alcanzables desde i ; por su parte, en la j —ésima columna se tendran 1's en las filas correspondientes a los predecesores ($Pred[j]$), o sea a los nodos desde los que directamente se puede llegar a j . Para aclarar el concepto de Matriz de Adyacencia, téngase en cuenta el siguiente ejemplo.

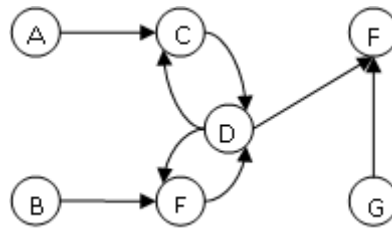


Figura 2.3: Grafo Ilustrativo

Supongase que cada uno de los nodos de A hasta G, son las variables del modelo en cuestion y los arcos dirigidos son las relaciones es usado en. La matriz de adyacencia del sistema anterior es:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccccc}
 & A & B & C & D & E & F & G \\
 A & \left[\begin{array}{ccccccc}
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right] \\
 B \\
 C \\
 A=D \\
 E \\
 F \\
 G
 \end{array}
 \end{array}$$

Figura 2.4: Matriz de Adyacencia Modelo Poblacional

Otra matriz de gran utilidad es la Matriz de Accesibilidad. Esta matriz, también binaria, tendr el mismo tamaño que la matriz de adyacencia y sus celdas a_{ij} tendran un valor de 1 si y solo si el nodo i incide directamente o indirectamente en el comportamiento del nodo j . Se dice q i incide directa o indirectamente en el nodo j , si es posible acceder al nodo j desde el nodo i siguiendo una ruta determinada independientemente del número de nodos (pasos) intermedios. Oliva describe la naturaleza de los arcos en una Matriz de Accesibilidad de la siguiente manera: si el arco o celda a_{ij} tiene un valor de uno, es porque el nodo i es antecedente del nodo j . Consistentemente, la i —ésima fila contendr valores de uno en las columnas de los nodos que sean sucesores inmediatos o no inmediatos del nodo i ; a su vez, la j —ésima columna contendr valores de uno en las filas que sean predecesores inmediatos o no inmediatos del nodo j . La manera propuesta por Oliva para calcular la Matriz de Accesibilidad consiste en construir una matriz B que sea igual a la Matriz de

Adyacencia A mas su matriz identidad y luego elevar B a una potencia booleana k , tal que B_{k-1} sea diferente de B_k , siendo esta última la Matriz de Accesibilidad R . La Matriz de Accesibilidad tendrá, lógicamente, su diagonal principal llena de unos, haciendo que cada nodo sea a la vez sucesor y predecesor de sí mismo.

Para el ejemplo en cuestion, la matriz de Accesibilidad es:

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C & D & E & F & G \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 2.5: Matriz de Accesibilidad

Notese que a pesar de que no hay un arco que una a A con F , F es accesible desde A pasando por C y D .

Particiones Estructurales: Las particiones estructurales son una agrupacion de las variables basada en la relacion entre dichas variables y pueden resultar muy útiles en la simplificacion de la calibración de modelos. Dentro de estas particiones estructurales se pueden distinguir las particiones de nivel y las particiones cíclicas.

Particiones de nivel: Las particiones de nivel se basan en la estructura causal del modelo y agrupan las variables de acuerdo con su dependencia a otras variables del modelo. Los componentes del primer nivel seran aquellas variables cuya dependencia recaiga sobre sí mismas, es decir que no tengan ningún sucesor por fuera de su conjunto de predecesores en la Matriz de Accesibilidad (note que los nodos componentes de un loop hacen parte de un mismo nivel, pues no es posible distinguir entre ellos antecesores de sucesores). Los niveles posteriores se construyen extrayendo a las variables de los niveles ya formados, del conjunto de nodos a considerar e identificando aquellas variables que no tengan ningún sucesor por fuera de su conjunto de predecesores, teniendo en cuenta sólo los nodos que se encuentre

en el conjunto de nodos remanente. La operacion finaliza cuando todos los nodos o variables hayan sido asignados a un nivel determinado. El procedimiento se puede resumir en el siguiente conjunto de pasos.

1. Asignar al primer nivel, $L(k)$ con $k = 1$, el conjunto de variables de la Matriz de Accesibilidad contenidas en $V(R)$, para las cuales su conjunto de sucesores, $Succ[i]$ sea igual a su conjunto de predecesores, $Pred[i]$ según dicha matriz.
2. Excluir las variables asignadas al primer nivel del conjunto de nodos a evaluar, es decir, hacer $V(R)$ igual a $V(R) - L(k)$
3. Repetir el punto 1, para el nivel $k+1$ sin tener en cuenta las variables asignadas a niveles inferiores, es decir, considerando sólo las variables contenidas en el nuevo $V(R)$.
4. Repetir los puntos 2 y 3 hasta que no quede ninguna variable por evaluar, o sea, hasta que $V(R)$ sea igual a vacío.

Las particiones de nivel para el ejemplo considerado son

1. Nivel 1: F, pues no existe intersección alguna entre sus sucesores y predecesores salvo él mismo. En otras palabras, no hay forma de llegar a este nodo salvo partiendo de él mismo.
2. Nivel 2: C, D, E y G, pues, excluyendo a F, previamente asignado, no tienen sucesores por fuera de sus predecesores. Note que desde cualquiera de estos nodos es posible llegar hasta F en pasos sucesivos.
3. Nivel 3: A y B, pues excluyendo a las variables ya asignadas a niveles inferiores (C, D, E, F y G), no tienen sucesores por fuera de sus predecesores.

Particiones cíclicas: Las particiones cíclicas agrupan a todas las variables que hagan parte de un mismo ciclo, entendiendo por un ciclo a un conjunto de variables pertenecientes a loops interconectados en el modelo. Dichas variables, naturalmente,

son accesibles entre sí, lo que se traduce en que tendrán el mismo conjunto de sucesores que de predecesores en la Matriz de Accesibilidad, por lo que se encontraran en un mismo nivel de partición.

En el ejemplo en cuestion, se puede identificar una particion cíclica que contiene a los vértices C, D y E. Notese que estas tres variables tienen el mismo conjunto de sucesores y de predecesores y además el nodo D interconecta los loops CD y DE.

Ahondando en la estructura de las particiones cíclicas, la identificacion de loops contenidos en una particion cíclica empieza con la construcción de una matriz de distancia D, no binaria y cuadrada, que muestre en cada celda la longitud del camino mas corto entre dos vértices. Entiéndase por camino a la secuencia de nodos y arcos entre dos vértices sin que haya nodos repetidos. Se debe construir una matriz de distancia para cada partición cíclica en el modelo. Oliva propone calcular esta matriz de distancia, partiendo de la Matriz de Adyacencia para la partición cíclica, y procediendo de la siguiente manera

$$B = C + I \quad [2.1]$$

$$D = C + \sum_{i=2}^{k-1} i \cdot B^i - B^{i-1} \quad [2.2]$$

En 2.1 C es la Matriz de Adyacencia para la partición cíclica en cuestion; I es su matriz identidad, y la sumatoria indicada va desde 2 hasta el tamaño de la Matriz de Adyacencia para la partición cíclica menos uno. Es importante señalar que las potencias de la matriz B son booleanas, es decir que al sumar las matrices se tendrá que $0 + 0 = 0$, $0 + 1 = 1$ y $1 + 1 = 1$.

Por otra parte, se define como circuito entre dos vértices i y j, al camino que va desde i hasta j y luego de regreso a i. Note que esta definicion es análoga a la de un loop. Suplementariamente, un circuito geodésico es aquel que contiene el mínimo de arcos posibles de los circuitos que unen a i y j, es decir, el más economico en número de arcos (pasos) necesarios para cerrar el circuito. Note que un circuito geodésico es el loop más corto posible que contiene a los nodos i y j, y puede ser identificado

por simple inspección de la matriz de distancia entre dos vértices cualesquiera. La matriz D para el ciclo del ejemplo considerado es

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} C & D & E \end{matrix} \\ \begin{matrix} C \\ D \\ E \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 2.6: Matriz D

Luego de que se tenga la matriz de distancia para cada participación cíclica, se puede construir la matriz de longitud (L), también para cada partición cíclica. Dicha matriz será cuadrada no binaria, y contendrá las longitudes o número de arcos de los circuitos geodésicos entre cualquier par de vértices. El tamaño de la matriz L será igual al tamaño de la matriz D , que es a su vez igual al número de variables presentes en la partición.

Oliva propone calcular la matriz L a partir de la matriz D , sumando la transpuesta de la componente triangular debajo de la diagonal principal de D con la componente triangular por encima de dicha diagonal.

$$L = \begin{matrix} & \begin{matrix} C & D & E \end{matrix} \\ \begin{matrix} C \\ D \\ E \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 2 & 4 \\ 2 & 0 & 2 \\ 4 & 2 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 2.7: Matriz de Longitud

Luego de construir las matrices de adyacencia, de distancia y de longitud para cada partición cíclica, se procede a identificar los nodos que conforman los circuitos geodésicos de cada partición cíclica. Para ello se deben seguir los siguientes pasos

1. Crear la matriz de distancia.
2. Crear la matriz de longitud, la cual contiene el número de arcos de los circuitos geodésicos entre cada par de vértices.
3. Para una longitud de k arcos, iniciando con $k = 2$, identificar a todos los pares de vértices con circuitos geodésicos de longitud igual a k , en la matriz L .

4. Para cada pareja i, j encontrada en el punto 3, identificar los vértices que hagan parte de un camino geodésico entre i y j , y entre j e i , incluyendo los nodos extremos. Esto se logra realizando la siguiente serie de pasos para $k = 1$ hasta $D_{ij}-1$, donde D_{ij} es la distancia que separa a i de j y que se identifica en la matriz de Distancia.

- a) Situarse en el nodo de inicio, i , $m = i$.
- b) Identificar los nodos sucesores de i , que se encuentren a una distancia de 1 del nodo m , en el primer caso, con $m = i$.
- c) Identificar los predecesores de j que se encuentren a una distancia $k - 1$ de m .
- d) Identificar un vértice que haga parte de los nodos encontrados en el punto b y en el punto c y almacenarlo en la lista de nodos que haran parte del camino geodésico entre i y j , y hacer m igual al nodo encontrado.
- e) Situarse en el nodo identificado en el punto d, que ahora es el nodo m y repetir los pasos b, c y d hasta que se cumpla que k sea igual a $D_{ij}-1$.

En el caso hipotético en que haya mas de un camino geodésico, se encontrar solo uno de los que existan.

Kampmann and Oliva (2006), los autores idearon un algoritmo para la construccion del ILS adicionando los siguientes puntos a los expuestos anteriormente:

5. Remover loop identificado en el punto 4 de los loops restantes a evaluar.
6. Incluir el loop especificado en el punto 4 en una lista definitiva de loops geodésicos (lps), si y sólo si dicho loop no incluye nodos repitentes, lo que se conoce como loop único.
7. Repetir los puntos del 3 al 6 para todas las longitudes de circuitos geodésicos registradas en la matriz L y para todas las particiones cíclicas.

En el algoritmo descrito anteriormente se identifican los loops geodésicos de una particion cíclica. A partir de esta idea, Oliva creó otro tipo de algoritmo que daría

finalmente como resultado el SILS (Oliva, 2004). Este algoritmo parte de la Matriz de Adyacencia y de todos los loops geodésicos identificados. El algoritmo puede resumirse como sigue:

1. Crear una matriz B llena de ceros con el mismo tamaño que la Matriz de Adyacencia para la partición cíclica C .
2. Hacer el contador de loops n igual a 1.
3. Crear un conjunto S con todos los loops geodésicos identificados.
4. Identificar los arcos en cada loop p y almacenarlos en $E(p)$ de la siguiente manera
 - Para cada loop que pertenezca a lps , es decir, para cada loop geodésico de la partición C , calcular la longitud del loop, len .
 - Para q igual desde uno hasta la longitud del loop, len , guardar los arcos del loop en $E(p)$
5. Para cada loop en S contar los nuevos arcos que el loop introduciría en la matriz de adyacencia B .
6. Si el loop no contiene ningún nuevo arco, sencillamente retirarlo del conjunto S .
7. Identificar dentro de los loops que introducirían nuevos arcos, aquel loop que incluiría un menor número de arcos.
8. Añadir los arcos del loop identificado en el punto 7, a la matriz B .
9. Añadir el loop al conjunto SILS y remover el loop elegido del conjunto S .
10. Repetir los puntos del 5 al 9 mientras el conjunto S no esté vacío.

Mediante el algoritmo anterior, se construye un conjunto de los loops geodésicos independientes para todas las particiones cíclicas del modelo. El SILS descompone cada partición cíclica en su máximo número de loops independientes, así que de manera única provee la descripción más simple y granular de la estructura de una

particion cíclica y simplifica el análisis del modelo al analisis de los loops geodésicos independientes.

En resumen, un modelo puede contener un conjunto de participaciones por niveles estructuralmente independientes, y a su vez cada nivel un número de ciclos. Cada ciclo puede contener un número maximo de loops independientes entre sí que es menor o igual a su número original de loops constituyentes. El SILS identifica un subconjunto de variables del modelo original, constituyentes de circuitos geodésicos, que recogen el comportamiento estructural del modelo original en su version más basica.

Luego de construir el SILS, es posible establecer una jerarquía dentro del mismo. La idea es identificar qué loops están incluidos dentro de otro loop. Esto ocurrir siempre y cuando todos los arcos de un loop pertenezcan a otro de mayor longitud. En el primer nivel de la jerarquía estarán entonces todos los loops que no contengan a ningún otro loop dentro de sí. El segundo nivel estar conformado por loops que contienen a loops de la la primera jerarquía y así, de forma sucesiva se pueden ir construyendo los demás niveles, hasta llegar al último nivel compuesto por loops que no estén incluidos dentro de otros loops. Esto permite entender la complejidad de la particion cíclica empezando por sus loops mas simples, cuya informacion permitir un mejor entendimiento de los loops que los comprenden.

Paso #4 Matriz de Ganancia G

La matriz de ganancia, representa la relación entre las variables de estado en su forma mas compacta. En efecto, los pathways que conectan las diferentes variables de estado pueden ser agregados en un solo arco y las ganancias de estos arcos compuestos serán los elementos de la matriz de ganancia. En los modelos lineales, las ecuaciones de estos arcos compuestos son muy simples y sus valores serán constantes; sin embargo, en los modelos no lineales, se deber recurrir al calculo de derivadas parciales de cada variable de estado respecto a cada variable de estado. En estos casos, la matriz de ganancia tendrá la siguiente estructura

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \dot{x}_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \dot{x}_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

Figura 2.8: Estructura de la Matriz de Ganancia

Cada entrada de la matriz de ganancia $\frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_j}$, constituye una ganancia neta compacta, que representa la tasa de cambio neta de la variable i en respuesta a un cambio de nivel en la variable de estado j .

Paso #5 Simulación del modelo a lo largo del tiempo

Esta operación consiste en simular el modelo y leer la matriz de ganancia, las ganancias de los pathways y los flujos netos de las variables de estado a lo largo del tiempo. Para este paso, se toma el modelo original y se crean pathways auxiliares por cada uno de los pathway originales. Estos pathways auxiliares se diferencian de los pathways originales en que las variables de estado están desfasadas en un factor h . Estos pathways auxiliares son anexados al modelo y se procede a simular el modelo. Luego se toman los resultados en el tiempo de los pathways y los pathways auxiliares y se encuentran los valores aproximados de las derivadas de los pathways y la matriz de ganancias en el tiempo.

Paso #6 Modos elementales de comportamiento

La identificación de los modos de comportamiento parte del cálculo de los eigenvalores y los eigenvectores del modelo en cada tiempo de simulación establecido. Saleh and Davidsen (2000) han identificado los siguientes modos elementales de comportamiento

- Convergente monotonico, asociado a valores reales negativos de los eigenvalores (Figura 2.9.a).
- Divergente monotonico, asociado a valores reales positivos de los eigenvalores (Figura 2.9.b).

- Oscilatorio sostenido, asociado a eigenvalores con una pareja conjugada compleja, con valor de cero en la parte real (Figura 2.9.c).
- Oscilatorio convergente, asociado a eigenvalores con una pareja conjugada compleja, con valor negativo en la parte real (Figura 2.9.d).
- Oscilatorio divergente, asociado a eigenvalores con una pareja conjugada compleja, con valor positivo en la parte real (Figura 2.9.e).

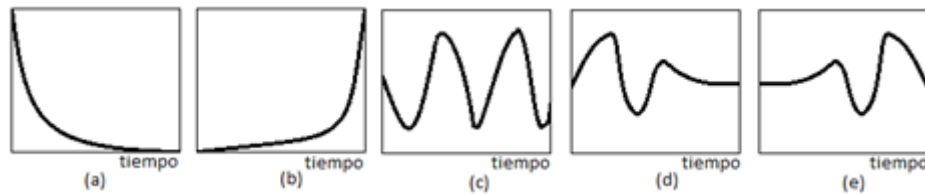


Figura 2.9: Modos Elementales de Comportamiento

Ademas de determinar las características de todos los modos elementales de comportamiento del sistema, es necesario establecer la contribución de cada modo de comportamiento al comportamiento de la variable de interés. La contribucion de cada modo de comportamiento al comportamiento de la variable de estado de interés, puede ser evaluado mediante la desactivación sucesiva de todos los modos de comportamiento, menos de uno, y notando el cambio a través del tiempo del vector de pendiente. Su calculo parte del cómputo de los vectores de pendiente.

El vector de pendiente para un instante dado viene a ser calculado mediante la siguiente expresion

$$s = \alpha_1 r_1 + \alpha_2 r_2 + \dots + \alpha_n r_n \quad [2.3]$$

donde r_i es el eigenvector asociado con el i —ésimo modo de comportamiento y α_i es el coeficiente del i —ésimo modo de comportamiento, calculado de la siguiente manera

$$\alpha_i = \alpha_i^0 e^{\lambda_i(t-t_0)} \quad [2.4]$$

donde t_0 es el tiempo inicial, α_i^0 es el valor inicial de α_i en t_0 y λ_i es el eigenvector asociado al i -ésimo modo de comportamiento.

$$S_{ip}^0 = \alpha_i^{\lambda_i(t-t_0)} r_{ip} = \alpha_i^0 r_{ip} \quad [2.5]$$

$$S_{ip}^{dt} = \alpha_i^{\lambda_i(dt-t_0)} r_{ip} \quad [2.6]$$

En cada instante, la ecuacion anterior provee la porcion inicial y final de la pendiente de la variable de interés p a partir del i -ésimo modo de comportamiento. El cambio en la variable de estado p debido al i -ésimo modo de comportamiento ser entonces

$$4S_{ip} = S_{ip}^{dt} - S_{ip}^0 \quad [2.7]$$

Para entender mejor la contribucion que cada modo de comportamiento tiene en el comportamiento general de la variable de interés, se normalizan los valores de los cambios calculados mediante la ecuacion anterior, como sigue

$$C_{ip} = \frac{4S_{ip}}{\sum_{m=1,p} |4S_{mp}|} \quad [2.8]$$

Los cambios normalizados solo pueden tomar valores entre -1 y 1, el cual representa el valor que tome como un porcentaje de contribucion. Un cambio normalizado que sea negativo indica que ese modo de comportamiento provoca el decrecimiento de la pendiente de la variable de interés en ese intervalo; un cambio normalizado positivo, indica que ese modo de comportamiento provoca el crecimiento de la pendiente de la variable de interés en ese intervalo.

Todavía queda la cuestión del cálculo de los α_i^0 ante lo cual, Saleh and Davidsen (2000) proponen el siguiente procedimiento.

Los valores de α_i^0 representan los componentes del vector de pendiente inicial a partir del correspondiente eigenvector. Supongase que se tienen sólo dos variables

de estado, entonces los valores α_i^0 son computados resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\text{valor inicial del vector de pendiente } 1 = \alpha_1^0 * r_1(1) + \alpha_2^0 * r_2(1) \quad [2.9]$$

$$\text{valor inicial del vector de pendiente } 2 = \alpha_1^0 * r_1(2) + \alpha_2^0 * r_2(2) \quad [2.10]$$

donde $r(i)$ es el i -ésimo elemento del vector. El sistema de ecuaciones anterior, visto de forma matricial sería:

$$\begin{bmatrix} \text{valor inicial del vector de pendiente } 1 \\ \text{valor inicial del vector de pendiente } 2 \end{bmatrix} = R * \begin{bmatrix} \alpha_1^0 \\ \alpha_2^0 \end{bmatrix} \quad [2.11]$$

$$S^0 = R * \begin{bmatrix} \alpha_1^0 \\ \alpha_2^0 \end{bmatrix} \quad [2.12]$$

donde R contiene a todos los eigenvectores asociados con cada uno de los eigenvalores (Saleh and Davidsen, 2000). Reordenando la ecuacion anterior, se tiene:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1^0 \\ \alpha_2^0 \end{bmatrix} = R^{-1} * S^0 \quad [2.13]$$

Ahora, se tiene que R^{-1} es igual a L^T , es decir a la transpuesta del eigenvector izquierdo, asociado al eigenvalor λ_i . Un eigenvector izquierdo de una matriz A , viene de la siguiente expresion:

$$L^T * A = \lambda * L^T \quad [2.14]$$

Por otro lado, téngase presente que cada componente i del vector inicial de pendiente puede calcularse como la primera derivada de cada variable i evaluada con los valores iniciales del modelo.

Paso #7 Elasticidades de los arcos compactos de ganancia

Una vez se han identificado los modos de comportamiento, se deben calcular las elasticidades de los modos de comportamiento (eigenvalores) respecto a los arcos de ganancia compacta de la matriz G.

La elasticidad de un eigenvalor respecto a una variable mide el porcentaje de cambio en el eigenvalor debido a un porcentaje de cambio dado en dicha variable. La sensibilidad $S_{pq,i}$ de un eigenvalor λ_i respecto a una variable pq, viene dado por la derivada parcial del eigenvalor respecto a la variable. Se tiene disponible la siguiente expresion para el calculo de las elasticidades de los eigenvalores respecto a los arcos de ganancia de la matriz G

$$l_{pq,i} = l_i(p) * r_i(q) * \frac{g_{pq}}{\lambda_i} \quad [2.15]$$

donde

- $l_i(p)$ es el p—ésimo componente del i—ésimo eigenvector izquierdo
- $r_i(q)$ es el q—ésimo componente del i—ésimo eigenvector derecho
- g_{pq} es la ganancia del arco de p a q
- λ_i es el i—ésimo eigenvalor

Paso #8 Elasticidades de los arcos causales

Ahora, se utilizarán las elasticidades de los arcos compactos de ganancia para el calculo de las elasticidades de los eigenvalores respecto a los arcos causales identificados previamente. Lo que sucede es que las elasticidades de los arcos compactos de ganancia no son de mucha utilidad en cuanto a la identificación de la estructura dominante. Por ello se busca el calculo de las elasticidades de los eigenvalores respecto a los arcos causales, lo cual se realiza mediante la siguiente expresión

$$l_{j,i} = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n l_{pq,i} \frac{\sum_{s=1}^n g_{pq,s}}{\sum_{r=1}^n g_{pq,r}} \quad [2.16]$$

donde

- $l_{j,i}$ es la elasticidad del eigenvalor λ_i , respecto al arco causal l_j .
- $p_{q,i}$ es la elasticidad del eigenvalor λ_i , respecto al arco de ganancia compacta pq , g_{pq}
- $g_{pq,s}$ es la ganancia del pathway s de la variable de estado p a la q
- $g_{pq,r}$ es la ganancia del pathway r de la variable de estado p a la q
- S es el número de pathways en los que el arco causal l_j participa
- R es el número total de pathways entre las variables de estado p y q .

Paso #9 Matriz dirigida de ciclo

Esta matriz tiene en sus filas a los arcos causales, y en sus columnas a los loops del SILS, previamente identificados, de tal forma que el componente de la matriz d_{ij} , ser igual a 1 si el arco causal i pertenece al loop j , y ser cero en otro caso.

La matriz dirigida permite relacionar a los arcos causales con los loops del SILS de la siguiente manera

[illegible]

donde el_j representa la elasticidad del arco causal j , la cual es conocida, mientras que el_{p_k} representa la elasticidad del loop k , la cual es desconocida. Saleh and Davidsen (2000) y Güneralp (2006) han demostrado ampliamente que, a pesar de que en la mayoría de casos el vector que contiene las elasticidades de los arcos es mas grande que el contiene las elasticidades de los loops, el sistema de ecuaciones resultante siempre tiene solucion única.

Paso #10 Elasticidad general del Loop

Por último, se procede a calcular y graficar los valores de la elasticidad general del loop y evaluar los resultados encontrados. Habiendo calculado las elasticidades del loop en el paso anterior, la elasticidad general del loop puede ser calculada multiplicando la elasticidad del loop en relación con cada eigenvalor por la contribucion de dicho eigenvalor.

Cuando se tiene mas de un modo de comportamiento dominante, es posible calcular la contribución de cada modo de comportamiento al comportamiento general de la variable de interés. Los valores de cambio normalizados pueden servir como una ponderacion de dicha contribucion de cada modo de comportamiento. Estos valores, a su vez, pueden ser usados como ponderacion para el calculo de las elasticidades de cada loop de cada modo de comportamiento para cada loop en el SILS. Los valores resultantes reflejaran entonces la influencia de los loops en el comportamiento de la variable de interés en cualquier instante y pueden ser calculados mediante la siguiente expresión:

$$oe_k = \sum_{i=1}^{\infty} c_i e_k^i \quad [2.18]$$

donde oe_k representa la influencia de los loop en el comportamiento de la variable de estado, e_i^k es la elasticidad del i – esimo modo de comportamiento para el loop k .

Nuevamente, se procede a normalizar los valores hallados mediante la ecuación anterior, como sigue, donde re_k representa los valores normalizados de oe_k :

$$re_k = \frac{oe_k}{\sum_{j=1}^{\infty} |oe_j|} \quad [2.19]$$

Los valores normalizados de las elasticidades variaran entre -1 y 1. Un valor negativo (positivo) para un loop en un instante dado, significa que ese loop lleva el comportamiento de la variable de estado de interés en una direccion negativa (positiva). En la medida en que la elasticidad del loop esté mas cerca de -1 o 1,

ser mayor la dominancia que dicho loop tiene en el comportamiento de la variable de interés.

Los valores resultantes de elasticidad del loop son entonces graficados a través del tiempo, lo cual permite visualizar la evolución de la dinamica de dominancia del loop sobre la variable de interés, a lo largo del tiempo.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Por medio de las librerías DLL de Vensim, es posible leer desde la herramienta la información concerniente con los nodos del sistema. Así mismo, mediante el uso de los objetos del programador, se especifican las variables de estado de interés, con lo que queda cubierto el primer paso de la metodología descrita en la sección 2.3. Es importante destacar que el diseño de la herramienta no es descrito en el mismo orden en que son enunciados los pasos de la metodología de Güneralp.

De manera General el Software diseñado tiene el siguiente diagrama de flujo:

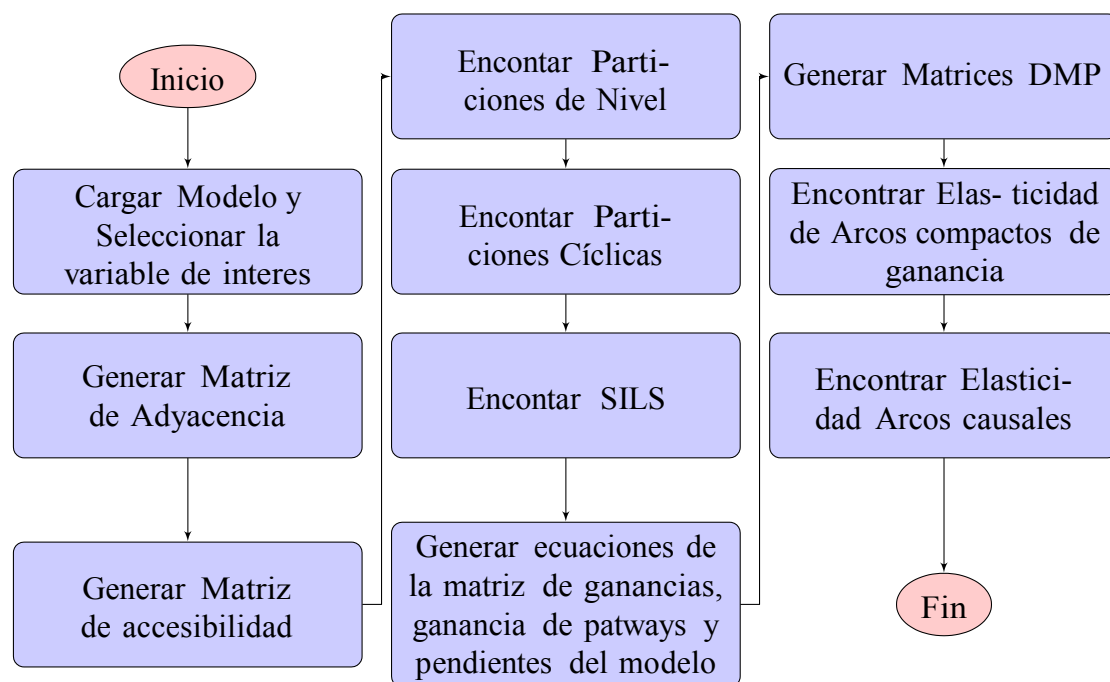


Figura 3.1: Diagrama de Flujo

3.1. MATRIZ DE ADYACENCIA

La Matriz de Adyacencia (matriz A) contiene valores binarios, y cada celda con valor igual a 1, indica que el nodo i incide directamente sobre el nodo j . El algoritmo para la obtencion sistematica de esta matriz, sin importar el tamaño del modelo, está disponible en Oliva (2004) . Se debe tener en cuenta para esto que las columna i de la matriz A representa las causas directas de i , así como la fila j representa los efectos directos de j . Para la determinación de la matriz A podemos movernos ya sea por columnas (causas) o filas (efectos). A continuacion se presenta el pseudo-codigo para determinar la matriz A por sus causas.

Algoritmo 3.1: Pseudocodigo para Encontrar la Matriz de Adyacencia

```
1  N ← número de variables del sistema ;
2  for i ← 1 To N do
3      |
4      for j ← 1 To N do
5          | if j ∈ C y i = j then
6              | Adjacency_matrix(j, i) ← 1 ;
7          | else
8              | Adjacency_matrix(j, i) ← 0 ;
9          | end
10     | end
11 end
```

El codigo anterior puede ser explicado fácilmente tomando como base los ciclos for anidados en las líneas 2 y 4, estos ciclos llenan la matriz A con unos y ceros, fila por fila. El ciclo de la línea 2 recorre las filas de la matriz y el ciclo de la línea 4 se mueve a través de las columnas, si se encuentra que la variable de la columna es una causa de la variable correspondiente a la fila entonces se agrega un uno a esta posicion j de lo contrario se agrega un cero.

3.2. MATRIZ DE ACCESIBILIDAD

Habiendo obtenido la matriz A , se puede determinar la Matriz de Accesibilidad R que representa la incidencia directa e indirecta de un variable o nodo i sobre una variable j . Utilizando la manera propuesta por Oliva (2004), hemos diseñado un pseudo-código que

puede ser utilizado en lenguajes de programación no matemáticos. Primero se generan las matrices B y R (R inicial) a las que inicialmente se les asigna el valor de la matriz A sumándole la matriz identidad. Se utiliza una matriz temporal a la que se le asigna el valor de B_K . Luego esta matriz se compara con la matriz R que representa la matriz B_{K-1} ; si resultan diferentes, a la matriz R se le asigna el valor de B_K y a la matriz temporal el valor de B_{K+1} . Esto se repite hasta que el valor de la matriz temporal sea igual al valor de la matriz R (cumpliendo la condición del algoritmo de Oliva: $B_{K-1} = B_K = B_{K+1}=R$).

El código se muestra a continuación:

Algoritmo 3.2: Pseudocódigo para Encontrar la Matriz de Accesibilidad

```

1  N ← número de variables del sistema ;
2  B ← A + I;
3  R ← A + I;
4  sw ← Verdadero;
5  while sw = Verdadero do
6      for i ← To N do
7          for j ← To N do
8              Tmp ← 0 ;
9              for k ← To N do
10                 Tmp(i, j) ← Tmp(i, j) ∪ [R(i, k) ∩ B(k, j)] ;
11                 if Tmp = R then
12                     sw ← 0;
13                 else
14                     R ← Tmp;
15                 end
16             end
17         end
18     end
19 end

```

3.3. PATHWAYS Y ARCOS CAUSALES

Una vez determinadas las matrices A y R se deben identificar todos los pathways y arcos causales en el modelo. Los pathways son los caminos posibles para llegar de una variable de estado a otra variable de estado o a ella misma, sin repetir arcos en el camino, ni pasar por otra variable de estado. Tómese el siguiente ejemplo:

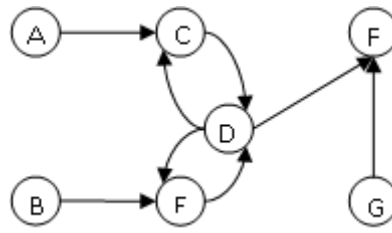


Figura 3.2: Grafo Ilustrativo

Considérese al nodo C y al nodo E de la Figura 12 como variables de estado del sistema. Se debe determinar todos los caminos posibles para pasar del de C – C, C – E, E – C y E – E. Nótese que para ir de C a C el único camino posible es pasando por D y regresando a C, para este caso el pathway sería C – D – C. Una ruta posible sería pasar de C a D luego a C, regresar por D y finalmente a E. La ruta sería C – D – E – D – C; a pesar de ser una ruta posible no puede ser considerada un pathway debido a que esta pasa dos veces por D, lo que quiere decir que la ruta C – D – E – D – C esta contenida en la ruta C – D – E – D – C = C – D – C. Por otra parte la ruta contiene la variable E que también es una variable de estado.

Para determinar de manera computacional los pathways de un sistema, se desarrolla un pseudo-código para encontrarlos de manera sistemática. Primero se forman parejas origen-destino usando las variables de estados. Para el ejemplo de la Figura 3.2 estas parejas serían C – C, C – E, E – C y E – E. Para el caso de un sistema de orden mayor por ejemplo orden 3, con variables de estado A, B y C, estas parejas serían A – A, A – B, A – C, B – A, B – B, B – C, C – A, C – B y C – C. El código para armar parejas se describe a continuación. Una vez determinadas las parejas, se determinan los pathways asociados a cada una de ellas. El nodo destino se asigna como nodo inicial de un camino temporal. Al comenzar solo se tiene un camino temporal. A continuación se consideran cada uno de los caminos temporales, y se determinan cuáles son los efectos de la última posición de cada uno de ellos. Cada uno de estos efectos generar un nuevo camino temporal en el cual estos estarán ubicados en la última posición del nuevo camino. Luego se evalúa si la posición final de cada uno de los nuevos caminos corresponde al nodo de destino. Si es así, este camino temporal se considera un pathway; dado el caso contrario se evalúa si la posición final es una constante, una variable de estado o una variable repetida

en el mismo camino. Si alguna de estas opciones se cumple, el camino se descarta y no es evaluado nuevamente. Si todos los caminos se asignaron o se descartaron se continúa con la siguiente pareja, de lo contrario se realiza el proceso nuevamente con los caminos que aun continúen abiertos. El pseudo-código se muestra en algoritmo 3.3.

En la línea 3 del código se plantea un ciclo que se encarga de recorrer cada una de las parejas de variables de estado. La idea del algoritmo es crear pathways temporales e ir descartando los que no cumplan las condiciones de validación. Al iniciar un ciclo en las líneas 4-8, se inicia con un solo pathway temporal iniciado en el origen. Al iniciar, el número de pathways temporales es uno. Luego el código entre las líneas 11 y 16 se asegura de tomar todas las causas de las variables al final de cada pathway temporal. Por ejemplo, supongamos que tomamos el pathway número 5 y éste está conformado como sigue: $A - B - D$, con origen en A y destino en un nodo F. Supongamos que las causas de D son (E, F, G). El ciclo se encarga, a partir de este pathway temporal, de generar tres nuevos pathways que serían, $A - B - C - D$, $A - B - C - F$ y $A - B - C - G$. El segundo camino generado será considerado un pathway, mientras los otros dos seguirán siendo pathways temporales hasta llegar al destino o hasta ser descartados. Al encontrar un pathway realizamos cuatro validaciones: la primera validación se encarga de buscar si la última posición es la variable destino; la segunda validación se encarga de buscar ciclos en el pathway; la tercera validación busca variables de estado diferentes al origen y al destino y por último se evalúa si el pathway es más largo que el número de variables en el sistema.

Según la secuencia se deben encontrar los arcos causales del sistema. Este proceso es actualmente realizado por medio de selección, es decir se toman todos los arcos del modelo y de manera manual se seleccionan aquellos que sean arcos causales. Los arcos causales representan un arco que va desde un nodo del sistema a otro, excluyendo las constantes. Los vínculos flujo-repositorio no son considerados arcos causales. A continuación se muestra un pseudo-código que muestra las reglas de decisión que determinan si un arco pertenece al conjunto de los arcos causales o no. El código se encarga de generar los conjuntos de las variables de nivel (variables de estados), las variables de flujo y

Algoritmo 3.3: Pseudocódigo para Encontrar los Pathways del Sistema

```
1  P ← Parejas de variables de estado;
2  LP ← kP k;
3  for m ← 1 To LP do
4    O ← nodo origen de la pareja Pm;
5    P ← nodo destino de la pareja Pm;
6    Path ← ∅;
7    sw ← 1;
8    N ← 1 numero de caminos temporales;
9    while sw = 1 do
10     for i ← 1 To N do
11       E ← efectos del último nodo en el camino i ;
12       NE ← numero de efectos del último nodo en el camino i ;
13       for j ← 1 hasta NE do
14         | Pathi-j ← Pathi + Ej;
15       end
16       N ← N + NE - 1;
17     end
18     Validación 1: Se encontró el destino;
19     for i ← 1 hasta N do
20       if última posiccion de Pathi es igual a D then
21         | Se bloquea la posición i;
22         | Se guarda el Pathi como un pathway;
23       end
24     end
25     for i ← 1 hasta N do
26       Validación 2;;
27       Se repitió un nodo en el camino;
28       Se descarta el camino;
29       Validación 3;;
30       Se encontr una variable de estado que no es la de destino;
31       Se descarta el camino;
32       Validación 4: ;
33       El camino es mas largo que el número de variables del sistema;
34       O la última posiccion es una constante;
35       Se descarta el camino;
36     end
37     if todos los caminos fueron descartados o aceptados then
38       | sw ← 0;
39     end
40   end
41 end
```

las constantes del sistema. Una vez se han cargado, se toma arco a arco y es analizado, descartando los que involucren constantes y los que comiencen en una variable de flujo. Luego a los arcos restantes se les evalúa si terminan en una variable de nivel y a estos últimos se les considera arcos causales. El código se muestra a continuación:

| | |
|----|---|
| | Algoritmo 3.4: Pseudocódigo para Encontrar los Vínculos Causales |
| 1 | $V_N \leftarrow$ Variables de nivel del modelo; |
| 2 | $V_F \leftarrow$ Variables de flujo del modelo; |
| 3 | $C \leftarrow$ Constantes del modelo; |
| 4 | $N \leftarrow$ número de variables del sistema; |
| 5 | for $i \leftarrow 1$ To N do |
| 6 | for $i \leftarrow 1$ To N do |
| 7 | if existe un arco entre $i \& j$ then |
| 8 | if i ó $j \in C$ then |
| 9 | Se descarta el vínculo; |
| 10 | else if $i \in V_F$ then |
| 11 | Se descarta el vínculo; |
| 12 | else if $j \in V_N$ then |
| 13 | El arco es un arco causal; |
| 14 | Links \leftarrow Links $\cup (i, j)$; |
| 15 | end |
| 16 | end |
| 17 | end |
| 18 | end |

En la siguiente sección, se describe el algoritmo para crear las particiones de nivel. Luego en la sección 3.5, se describe el algoritmo para crear las particiones cíclicas. El siguiente paso se encarga de determinar las particiones del sistema. Para ellos se genera un código que determina las particiones de nivel y otro que determina las particiones cíclicas del sistema.

3.4. PARTICIONES DE NIVEL

Para crear las particiones de nivel, el procedimiento es como sigue: se inicializa un vector que contenga todas las variables del sistema, así como una variable que contenga el número de niveles en el sistema, la cual se inicializa con cero. Luego para cada nivel el algoritmo se mueve a lo largo de cada variable del sistema. Si la variable no tiene

efectos, la agregamos al nivel evaluado. Una vez analizadas todas las variables, se sacan del conjunto V . Si el conjunto V es vacío, quiere decir que no existen más particiones. De lo contrario, se comienza el proceso nuevamente con las variables restantes. El pseudocódigo es mostrado a continuación.

Algoritmo 3.5: Pseudocódigo para Encontrar las Particiones de Nivel

```

1   $R \leftarrow$  Matriz de accesibilidad;
2   $R \leftarrow$  Variables del sistema;
3   $\text{Contado}_{\text{Nivel}} \leftarrow 0$  ;
4  while  $V \neq \emptyset$  do
5       $\text{Contado}_{\text{Nivel}} \leftarrow \text{Contado}_{\text{Nivel}} + 1$ ;
6      for  $i \leftarrow 1$  To  $k_V$  do
7           $\text{sw} \leftarrow 1$ ;
8          for  $j \leftarrow 1$  To  $k_V$  do
9              if Si  $V(j)$  es un efecto de  $V(i)$  then
10                  $\text{sw} \leftarrow 0$ ;
11             end
12         end
13         if  $\text{sw} = 1$  then
14              $\text{Partition}(\text{Level}_{\text{Count}}) \leftarrow \text{Partition}(\text{Level}_{\text{Count}}) \cup v(i)$ ;
15             suprimimos la fila  $V(i)$  y la columna  $V(i)$  de la matriz  $R$ ;
16         end
17     end
18      $V \leftarrow V \setminus \text{Partition}(\text{Level}_{\text{Count}})$ ;
19 end

```

En la línea 4 del código se genera un ciclo que asegura que todas las variables del sistema van a ser asignadas a una partición de nivel. Luego en la línea 6 se genera un ciclo que va a tomar cada una de las variables que no han sido asignadas aún y en la línea 9 se evalúa si la variable en cuestión tiene efectos. En caso de contener por lo menos un solo efecto esta variable no puede ser asignada aún. Si por el contrario, dicha variable no tiene efectos, se anexa a la partición de nivel en la línea 14. En la línea 15 se quitan la fila y columna correspondiente a la variable asignada al nivel de la matriz R , lo que quiere decir que la variable asignada ya no es causa ni efecto de ninguna otra en el modelo. Por último en la línea 18 se eliminan las variables asignadas al nivel del conjunto V ; si V aún contiene elementos se repite el proceso con las variables restantes.

3.5. PARTICIONES CÍCLICAS

Las particiones cíclicas se refieren a conjuntos de nodos que compartan tanto los sucesores como los predecesores en la Matriz de Accesibilidad, es decir que partiendo del elemento A en la particion cíclica se puede llegar a cualquier elemento de la particion incluyendo a A. El algoritmo 3.6 muestra como determinar las particiones cíclicas del sistema.

Algoritmo 3.6: Pseudocodigo para Encontrar Particiones Cíclicas

```

1  sw(i) ← verdadero;
2  CycleCount = 0;
3  N ← número de variables del sistema;
4  for i ← 1 To N do
5      if sw(i) = verdadero then
6          CycleCount ← CycleCount + 1;
7          CyclePartition(CycleCount, 0) ← 1;
8          CyclePartition(CycleCount, 1) ← i;
9          sw(i) ← falso;
10         for j ← 1 To N do
11             if sw(j) = verdadero then
12                 Tmp ← verdadero;
13                 for k ← 1 To N do
14                     if R(j, k) = R(i, k) k R(k, j) = R(k, i) then
15                         Tmp ← Falso;
16                     end
17                 end
18                 if Tmp = Verdadero then
19                     CyclePartition(CycleCount, 0) = CyclePartition(CycleCount, 0) + 1;
20                     CyclePartition(CycleCount, CyclePartition(CycleCount, 0) = j;
21                     sw(j) ← Falso
22                 end
23                 if CyclePartition(CycleCount, 0) = 1 then
24                     CycleCount ← CycleCount - 1;
25                 end
26             end
27         end
28     end
29 end

```

En la línea 4 se genera un ciclo que va a lo largo de todas las variables del sistema. Si la variable no ha sido incluida aún en una partición cíclica, esta comienza una nueva particion. La variable cycle_{count} representa el numero de ciclos encontrados; la variable cycle_{partition}(i, 0) representa la longitud del ciclo i; y por ultimo cycle_{partition}(i, j) representa

la variable en la posición j del ciclo i . En las líneas 6-9 inicializamos un nuevo ciclo, aumentando la variable $cycle_{count}$, haciendo la longitud de este ciclo igual a 1 y agregando la variable i al ciclo. Por último tenemos la variable $sw(i)$ que nos dice si la variable i ha sido o no agregada a una partición cíclica. Luego de agregada esta variable miramos entre las variables restantes (ciclo en la línea 10) y se evalúa cuáles de ellas comparten las mismas causas y efectos con la variable i . Si la variable j comparte las mismas causas y efectos de i , entonces la variable j se anexa a la partición cíclica en las líneas 19-21. Si al final de la iteración solo la variable i pertenece a la partición cíclica, esta partición se descarta.

3.6. SILS

Para encontrar los ciclos que conforman el SILS del sistema, se deben tomar los ciclos de cada partición cíclica y analizarlos. Para ello, primero se escribe cada ciclo de la partición cíclica en forma matricial. En otras palabras se le genera a cada ciclo una matriz A simplificada, eliminando de la matriz A del sistema los elementos que no pertenecen al ciclo. Cada una de estas matrices es conocida como la matriz E del ciclo. Además, se genera una matriz vacía llamada B que muestra el aporte de cada ciclo al sistema. Luego se busca entre los ciclos el que tenga la menor longitud y su matriz E es sumada a la matriz B . Si la matriz B sufre cambios quiere decir que el ciclo aporta arcos al sistema y por lo tanto hace parte del SILS; de lo contrario el ciclo es excluido. Luego el ciclo es retirado del conjunto de ciclos y se realiza nuevamente el proceso hasta que todos los ciclos hayan sido asignados o rechazados. Al finalizar el monitoreo de todos los ciclos dentro de una partición cíclica, la matriz B es la representación matricial de la partición cíclica. El proceso se repite para todas y cada una de las particiones cíclicas. A continuación se muestra el código para encontrar los ciclos pertenecientes al SILS para una partición cíclica.

Algoritmo 3.7: Pseudocódigo para Encontrar los Ciclos del SILS

```
1 Ciclosi ← todos los ciclos en la particion i;  
2 Eij ← forma matricial del ciclo j en la particion i;  
3 B ← 0;  
4 while Ciclosi ≠ ∅ do  
5   Max ← max(|Ciclosi|);  
6   Maxi ← argmax(|Ciclosi|);  
7   Bx ← B + EMaxi,i;  
8   if Bx = B then  
9     SILS ← SILS + Maxi;  
10    B ← Bx;  
11  end  
12  Ciclosi ← Ciclosi − Maxi  
13 end
```

El código anterior en la línea 1 anexa a la variable Ciclos_i todos los ciclos pertenecientes a la partición cíclica i. La matriz E es la representación matricial de dichos ciclos, como se explicó anteriormente. Entre todos los ciclos se encuentra el ciclo de mayor longitud; los empates se rompen arbitrariamente (líneas 5-6). El siguiente paso consiste en generar una matriz temporal llamada B_x. Dicha matriz es la adición de la matriz global B y la representación matricial del ciclo E (línea 7). Si la matriz B_x y la matriz B son diferentes, significa que el ciclo aporta información para la representación matricial de la partición. En otras palabras, el ciclo es linealmente independiente. De ser así, el ciclo es anexado al SILS del sistema; si no, simplemente es descartado, decisión tomada en la línea 8 del código.

3.7. MATRIZ DE GANANCIAS

Una vez calculado el SILS del sistema, se procede a encontrar la elasticidad de los valores propios del mismo. Para esto se determina la matriz G o Matriz de Ganancias, la cual representa la variación de una variable de estado respecto a otra.

Para generar la matriz de ganancias, se toma una a una cada pareja origen-destino y se selecciona del conjunto de pathways a aquellos que comuniquen la pareja seleccionada. Luego, recorriendo el pathway desde el nodo destino hasta el nodo origen (en forma inversa) hacemos sustituciones sucesivas para encontrar \dot{X}_i . Luego derivamos dicha expresión

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial X_1} & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial \dot{X}_n}{\partial X_1} \\ \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial X_2} & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \dot{X}_n}{\partial X_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial X_n} & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial X_n} & \dots & \frac{\partial \dot{X}_n}{\partial X_n} \end{bmatrix}$$

Figura 3.3: Matriz de Ganancias

respecto a la variable origen correspondiente para obtener $\frac{\partial \dot{X}_i}{\partial X_j}$. Repetimos lo mismo para cada pareja origen-destino y así obtenemos cada uno de los componentes de la matriz G .

Tomemos como ejemplo la Figura 2.3, y supongamos que A es nuestro nodo origen y F nuestro nodo destino. Facilmente podemos encontrar que hay solo un pathway entre A y F , el cual es $A - C - D - F$. Cualquier otro camino posible tendría ciclos. A manera de ejemplo, se proponen las siguientes ecuaciones para el modelo:

$$C = A^2 \quad [3.1]$$

$$D = \frac{C}{3} + E + 4 \quad [3.2]$$

$$F = D + G \quad [3.3]$$

Luego partiendo de F tenemos que:

$$F = \frac{C}{3} + E + 4 + G \quad [3.4]$$

$$F = \frac{A^2}{3} + E + 4 + G = \dot{X}_F \quad [3.5]$$

Finalmente derivamos F respecto a A y obtenemos:

$$\frac{\partial \dot{X}_F}{\partial X_A} = \frac{2}{3}A \quad [3.6]$$

Debido a que se pueden presentar discontinuidades y singularidades en la ecuación F , el valor de las derivadas de la matriz de ganancias se encuentra mediante una aproximación numérica, basada en aproximaciones de las derivadas direccionales y en el promedio de estas.

$$\frac{\partial \dot{X}_F}{\partial X_A} \Big|_{-} = \frac{\dot{X}_F(X_A - h) - \dot{X}_F(X_A)}{h} \quad [3.7]$$

$$\frac{\partial \dot{X}_F}{\partial X_A} \Big|_{+} = \frac{\dot{X}_F(X_A) - \dot{X}_F(X_A + h)}{h} \quad [3.8]$$

$$\frac{\partial \dot{X}_F}{\partial X_A} = \frac{\partial \dot{X}_F}{\partial X_A} \Big|_{-} + \frac{\partial \dot{X}_F}{\partial X_A} \Big|_{+} / 2 \quad [3.9]$$

$$h \approx 0 \quad [3.10]$$

La seleccion del valor de la variable h est directamente relacionada con qué tan buena es la aproximación matematica de la derivada. Si el valor de h es muy grande, estaríamos escogiendo puntos muy alejados entre sí, perdiendo precisión en el calculo de la derivada. Si por el contrario el valor de h es muy pequeño comparado con el dominio de la función, no vamos a poder medir (de manera computacional) los cambios en la funcion y terminaríamos siempre con una derivada igual a cero. En nuestro trabajo estamos usando un valor de h igual al 5 % del maximo valor en el dominio de la funcion.

El algoritmo para determinar la matriz de ganancias del sistema es un algoritmo de manipulacion de cadenas de caracteres, como se muestra en el algoritmo 3.8

Algoritmo 3.8: Pseudocodigo para Encontrar la Matriz de Ganancias

```
1 Variable ← Todas las variables de estado;
2 Pathways ← Todos los Pathways;
3 Nombres ← Nombres de las variables del sistema;
4 Ecuaciones ← Ecuaciones de todas las Variables del sistema;
5 S ← número de variables de estado;
6 P ← número de Pathways;
7 for i ← 1 To S do
8   for j ← 1 To S do
9     C ← 0;
10    for k ← 1 To P do
11      Ecuacion ← Ecuacionesj ;
12      Variableinicial ← variable inicial de Pathwayk ;
13      Variablefinal ← variable final de Pathwayk ;
14      if Variableinicial ← i y Variablefinal ← j then
15        C ← C + 1;
16        V ← número de variables en el Pathwayk ;
17        for k ← 1 To V do
18          | Reemplazar Nombresh por ecuacionesh en Ecuacion;
19        end
20        TGijc ←  $\frac{\partial \text{Ecuacion}}{\partial \text{Variable}_i}$  (derivada numerica);
21      end
22    end
23    Gij ← ∅;
24    for c ← 1 To C do
25      | Gij ← Gij + TGijc;
26    end
27  end
28 end
```

3.8. MATRICES DIRECTIVAS DE PATHWAYS Y SILS

Luego se tienen las matrices directas de pathways y SILS (DMP), en las que se representa si un arco causal se encuentra en un determinado pathway, la cual es llamada matriz directa de pathways. Esta matriz es calculada con la ayuda del Algoritmo 3.9.

Algoritmo 3.9: Pseudocódigo para Encontrar la Matriz DMP

```
1 P ← número de Pathways;
2 A ← número de Arcos Causales;
3 for i ← 1 To P do
4   for j ← 1 To A do
5     if Arco causalj pertenece al pathwayi then
6       | DMPij ← 1;
7     else
8       | DMPij ← 0;
9     end
10  end
11 end
```

Por otra parte, se tiene la matriz que muestra si un determinado arco causal esta dentro de un SILS, la cual es llamada matriz directa de SILS (DPS). La matriz DPS se encuentra con la ayuda del Algoritmo 3.10.

Algoritmo 3.10: Pseudocódigo para Encontrar la Matriz DPS

```
1 S ← número de ciclos en el SILS;
2 A ← número de Arcos Causales;
3 for i ← 1 To S do
4   for j ← 1 To A do
5     if Arco causalj pertenece al cicloi then
6       | DP Sij ← 1;
7     else
8       | DP Sij ← 0 ;
9     end
10  end
11 end
```

3.9. ELASTICIDAD DE LOS ARCOS COMPACTOS DE GANANCIA

Como paso siguiente se calcula la elasticidad de los arcos compactos de ganancia como es explicado en el Paso #7 en la Sección 2.3.

Algoritmo 3.11: Pseudocódigo para Encontrar la Elasticidad de los Arcos Compactos

```
1  T ← número de Periodos en la simulacion;
2  S ← número de variables de estado;
3  for t ← 1 To T do
4    A ← Valores de la matriz G en el tiempo t;
5    Evector ← Eigenvectores de la matriz A;
6    Evalues ← Eigenvalores de la matriz A ;
7    for j ← 1 To S do
8      p ← posición de j en la matriz A;
9      for k ← 1 To S do
10       q ← posicion de k en la matriz A;
11       for i ← 1 To kEvaluesk do
12          $e_{pqi} \leftarrow \text{Evector}_i[p] * \text{Evector}_i[q] * \frac{A_{pq}}{\text{Evalues}_i};$ 
13       end
14     end
15   end
16 end
```

El Algoritmo 3.11 calcula la elasticidad de los arcos compactos de ganancia. El ciclo de la línea 3 se encarga de movernos a través del tiempo para calcular esta elasticidad para cada una de las matrices G ya expresadas en forma de series de tiempo. Los ciclos en las líneas 7 y 9 nos mueven a través de cada origen y cada destino en la matriz de ganancias y el ciclo de la línea 11 sirve para evaluar cada eigenvalor. Finalmente en la línea 12 se aplica la Ecuacion 2.15. Para mas detalles ir a la Seccion 2.3.

3.10. ELASTICIDAD DE LOS ARCOS CAUSALES

El siguiente paso es encontrar la elasticidad de los arcos causales. Para esto desarrollamos el Algoritmo 3.12.

Los ciclos de las líneas 3 y 5 recorren cada uno de los arcos causales y a través de cada eigenvalor. En la línea 6 inicializamos el valor de la elasticidad del arco causal en cero. Luego nos movemos a través de cada pareja de variables de estado como se muestra en las líneas 7 y 8. Luego se crean los conjuntos S y R donde el conjunto R puede ser creado por una simple inspección de cada uno de los pathways donde se evalúe su origen y su destino. El conjunto S se puede calcular con la ayuda de la matriz DMP calculada con

Algoritmo 3.12: Pseudocódigo para Encontrar la Elasticidad de los Arcos Causales

```

1  V ← número de Variables de Estado;
2  A ← número de Arcos Causales;
3  for l ← 1 To A do
4      S ← conjunto de pathways que contienen el arco causal l;
5      for i ← 1 To V do
6          el,i ← 0;
7          for p ← 1 To V do
8              for q ← 1 To V do
9                  R ← conjunto de pathways que van de p a q
10                 eli ← eli + epqi *  $\frac{\sum_{s \in S} g_{pqs}}{\sum_{r \in R} g_{pqr}}$ ;
11             end
12         end
13     end
14 end

```

el Algoritmo 3.9. Finalmente en la línea 10 vamos acumulando el valor de la elasticidad para cada pareja $p - q$, donde g_{pqs} es el valor de la ganancia del pathway s que va de p a q . Para mas detalles ver el Paso #8 en la Seccion 2.3.

Habiendo calculado la matriz $DM P$ y la elasticidad de los arcos causales, se aplica la Ecuacion 2.17 para calcular la elasticidad de los ciclos pertenecientes al SILS (ver Pasos #9 y #10 en la Seccion 2.3).

CAPÍTULO 4

PRUEBA DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Con efectos de probar la funcionalidad de la herramienta se realizará el análisis de sensibilidad de 3 modelos, el primero es el modelo predador-presa previamente estudiado y analizado por Güneralp (2006), este modelo es un modelo poblacional que muestra la iteración entre las tasas de crecimiento de las poblaciones de predadores y de presas. El segundo modelo a estudiar es un modelo linear de inventarios el cual trata de regular los niveles de inventarios de una empresa por medio de la contratación o despido de fuerza de trabajo, este modelo fue previamente analizado y estudiado por Goncalves (2008). Finalmente, para probar la escalabilidad de la herramienta se analizará el modelo de caso de cadena de suministro (Amaya, 2011; Soto, 2010). Los resultados serán mostrados siguiendo el orden presentado en la metodología de los 10 pasos de Güneralp (2006), sin embargo la herramienta entrega los datos a solicitud del usuario.

4.1. MODELO PREDADOR-PRESA

Este modelo es de segundo orden, en el cual las dos variables de estado son predador y presa. El modelo es también conocido como Lotka-Volterra y presenta un comportamiento de oscilaciones no lineales. En él, se representa la dinámica poblacional de un sistema con presencia de un predador y su presa e intervienen, factores tales como la tasa de nacimiento de ambos actores, así como las posibles relaciones causales entre dichos factores.

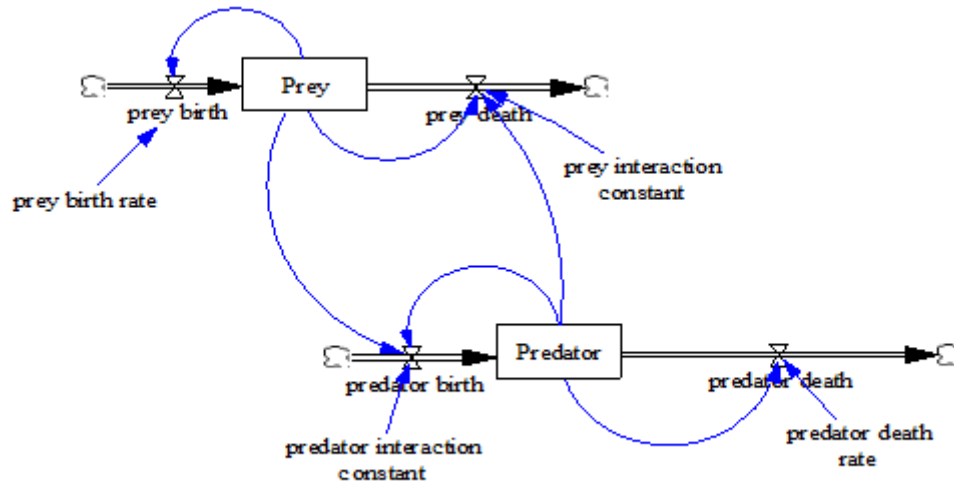


Figura 4.1: Modelo Predador - Presa

Fuente: Güneralp (2006)

Paso #1 : En este primer paso se procede a identificar y listar todos los nodos del sistema, así como las variables de estado de interés. Para el caso del modelo en estudio, se tiene:

Nodos:

- Predator (P)
- Predator Birth (PB)
- Predator Death (PD)
- Predator Interaction Constant (PIC)
- Predator Death Rate (PDR)
- Prey (Pr)
- Prey Birth (PrB)
- Prey Birth Rate (PrBR)
- Prey Death (PrD)
- Prey Interaction Constant (PrIC)

Variables de estado:

- Predator
- Prey

Variable de estudio (seleccionada por el usuario):

- Prey

Paso #2 : Una vez identificados los nodos del sistema, se procede a identificar los pathways y aquellos arcos causales que no contengan variables de estado, ni que sean vínculos flujo-repositorio. Esta información se resume a continuación.

Pathways:

- $P_{predator} \rightarrow P_{predatorBirth} \rightarrow P_{predator}$
- $P_{predator} \rightarrow P_{predatorDeath} \rightarrow P_{predator}$
- $P_{predator} \rightarrow P_{preyDeath} \rightarrow P_{prey}$
- $P_{prey} \rightarrow P_{preyBirth} \rightarrow P_{prey}$
- $P_{prey} \rightarrow P_{preyDeath} \rightarrow P_{prey}$

Arcos Causales:

- $P_{predator} \rightarrow P_{predatorBirth}$
- $P_{predator} \rightarrow P_{predatorDeath}$
- $P_{prey} \rightarrow P_{predatorBirth}$
- $P_{prey} \rightarrow P_{preyBirth}$
- $P_{prey} \rightarrow P_{preyDeath}$

Paso #3 : En este tercer paso se identifican y listan todos los loops del SILS, tal como se muestra a continuación.

SILS:

- $P_{predator} \rightarrow P_{predatorBirth} \rightarrow P_{predator}$
- $P_{predator} \rightarrow P_{predatorDeath} \rightarrow P_{predator}$

- $\text{Prey} \rightarrow \text{PreyBirth} \rightarrow \text{Prey}$
- $\text{Prey} \rightarrow \text{PreyDeath} \rightarrow \text{Prey}$
- $\text{Predator} \rightarrow \text{PreyDeath} \rightarrow \text{Prey} \rightarrow \text{PredatorBirth} \rightarrow \text{Predator}$

Paso #4 : Con base en la información de los pasos anteriores, se conforma la matriz de ganancia cuyo tamaño corresponder al orden del modelo analizado. La matriz de ganancia para el caso analizado se muestra a continuacion:

$$\begin{bmatrix} P_{IC} * P_r - P_{DR} & P_{IC} * P \\ -P_{rIC} * P_r & P_{rBR} - P_{rIC} * P \end{bmatrix} \quad [4.1]$$

Paso #5 : En este paso se registran los datos de la matriz de ganancia, las ganancias de los pathways, y los flujos netos de las variables de estado, a través del tiempo. Este paso se realiza mediante la simulacion del modelo en un período determinado.

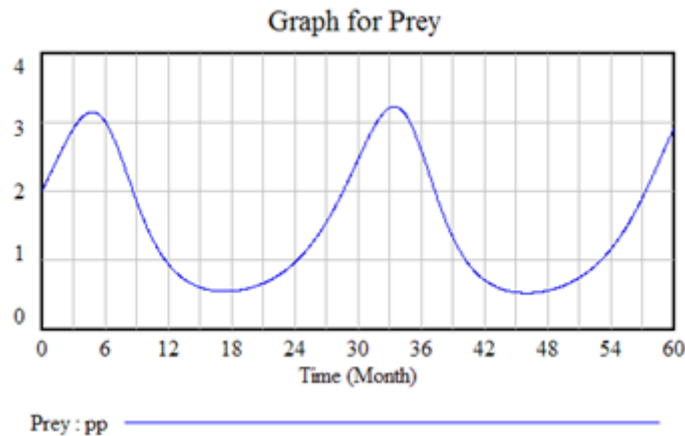


Figura 4.2: Comportamiento de la Variable Prey en el Modelo P-P

Paso #6 : En este paso se determinan las características de todos los modos elementales de comportamiento del sistema. Así mismo, se determina la contribucion de cada modo de comportamiento al comportamiento de la variable de estado de interés, tal como se muestra en la Figura 4.3, en la que se muestra el comportamiento de la parte real e imaginaria de los eigenvalores a lo largo del periodo de simulación.

Paso #7 : En esta etapa, se calculan las elasticidades de los eigenvalores respecto a los arcos compactos de la matriz de ganancias. Por tanto, cada modo de comporta-

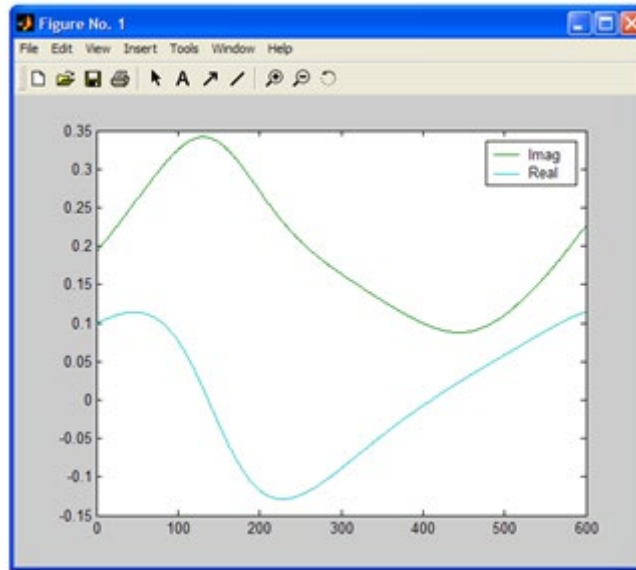
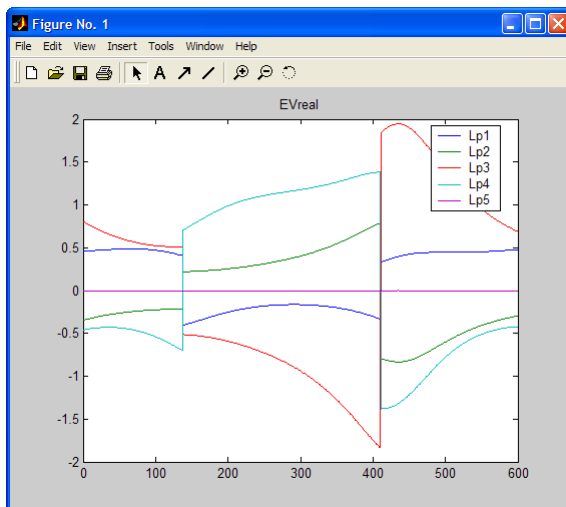
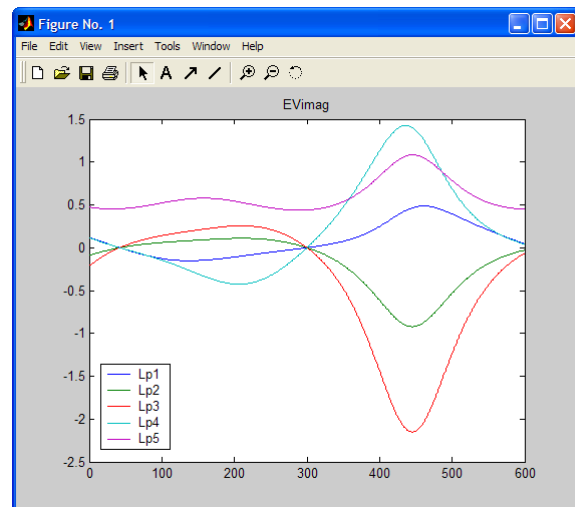


Figura 4.3: Comportamiento de los Eigenvalores

miento tiene una matriz que representa las elasticidades respectivas, tal como se puede apreciar en la Figura 4.4.



(Parte Real)



(Parte imaginaria)

Figura 4.4: Elasticidad de los Eigenvalores

Paso #8 : Este octavo paso consiste en el calculo de las ganancias de cada pathway.

Ganancia de los Pathways:

- Pathway₁ : $-P_{\text{redatorDeathRate}}$
- Pathway₂ : $P_{\text{redatorIterationConstant}} * P_{\text{rey}}$
- Pathway₃ : $P_{\text{redatorIterationConstant}} * P_{\text{redator}}$

- $\text{Pathway}_4 : -P_{\text{rey}} \text{IterationConstant} * P_{\text{rey}}$
- $\text{Pathway}_5 : P_{\text{rey}} \text{BirthRate}$
- $\text{Pathway}_6 : -P_{\text{rey}} \text{IterationConstant} * P_{\text{redator}}$

Paso #9 : En este paso se construye la matriz de ciclo dirigida, la cual relaciona los arcos identificados en el segundo paso y los loops identificados en el paso número tres. Dicha matriz se muestra a continuacion:

$$DP S = \begin{matrix} & \begin{matrix} \square & & \square \\ \square & & \square \\ \square & & \square \\ \square & & \square \\ \square & & \square \\ \square & & \square \\ \square & & \square \end{matrix} \\ \begin{matrix} 100000 \\ 010000 \\ 000010 \\ 000001 \\ 001100 \end{matrix} \end{matrix} \quad [4.2]$$

Paso #10 : Finalmente, se calculan y grafican las elasticidades globales a lo largo del tiempo, con el fin de evaluar los resultados obtenidos.

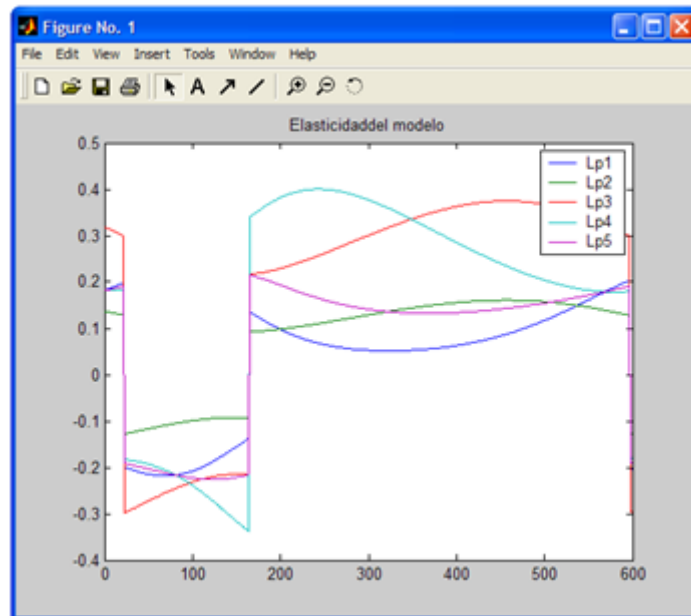


Figura 4.5: Elasticidad del Modelo

4.2. MODELO LINEAL DE INVENTARIO

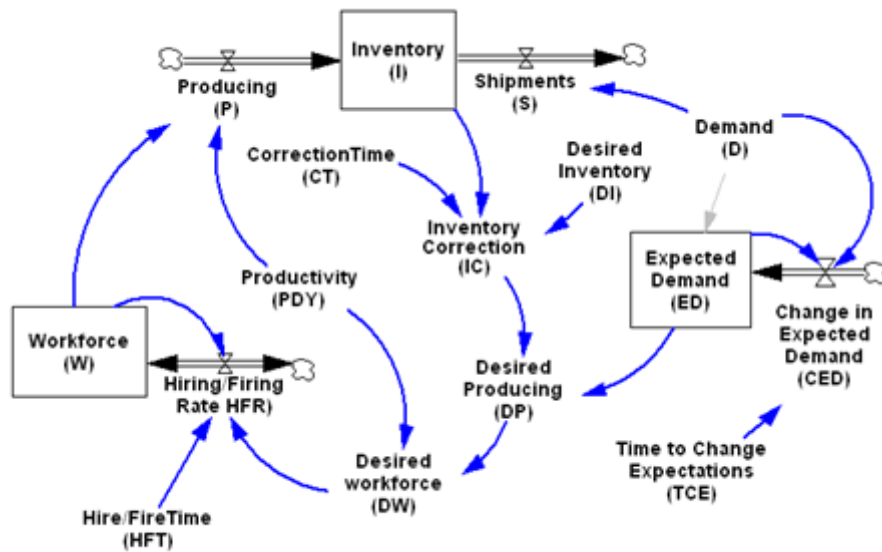


Figura 4.6: Modelo Lineal de Inventarios

Fuente: Goncalves (2008)

Para efectos de validación, presentamos el análisis del modelo “linear inventory-workforce oscillator”. Este modelo fue previamente analizado en Goncalves (2008). Este modelo representa un sistema de producción simple que busca mantener el inventario en un nivel deseado por medio de ajustes en la producción haciendo uso de la contratación o despido de empleados. El inventario es determinado como la diferencia entre la producción y los productos despachados. La producción es completamente dependiente del número de trabajadores y su productividad, mientras que la cantidad de productos despachados depende exclusivamente de la demanda de producto.

Paso #1 : En este primer paso se procede a identificar y listar todos los nodos del sistema, así como las variables de estado de interés. Para el caso del modelo en estudio, se tiene:

Nodos:

- Production
- Inventory

- Shipments
- Minimum Processing Time
- Correction Time
- Inventory Correction
- Desired Inventory
- Demand
- Expected Demand
- Change in Expected Demand
- Desired Production
- Time to Change Expectations
- Desired Workforce
- Hire/Fire Time
- Hiring/Firing Rate
- WorkForce
- Productivity

Variables de estado:

- Expected Demand
- Inventory
- Workfoce

Variable de estudio (seleccionada por el usuario):

- Inventory

Paso #2 : Una vez identificados los nodos del sistema, se procede a identificar los pathways y aquellos arcos causales que no contengan variables de estado ni que sean vínculos flujo-repositorio. Esta información se resume a continuación. Pathways:

- $ED \rightarrow CED \rightarrow ED$
- $ED \rightarrow DP \rightarrow DW \rightarrow HFR \rightarrow W$
- $I \rightarrow S \rightarrow I$
- $I \rightarrow IC \rightarrow DP \rightarrow DW \rightarrow HFR \rightarrow W$
- $W \rightarrow P \rightarrow I$
- $W \rightarrow HFR \rightarrow W$

Arcos Causales:

- $D \rightarrow CED$
- $D \rightarrow S$
- $DP \rightarrow DW$
- $DW \rightarrow HFR$
- $ED \rightarrow CED$
- $ED \rightarrow DP$
- $I \rightarrow IC$
- $I \rightarrow S$
- $IC \rightarrow DP$
- $W \rightarrow HFR$
- $W \rightarrow P$

Paso #3 : En este tercer paso se identifican y listan todos los loops del SILS, tal como se muestra a continuación. SILS:

- $CED \rightarrow ED \rightarrow CED$
- $HFR \rightarrow W \rightarrow HFR$
- $I \rightarrow S \rightarrow I$
- $DP \rightarrow DW \rightarrow HFR \rightarrow W \rightarrow P \rightarrow I \rightarrow IC \rightarrow DP$

Paso #4 : Con base en la información de los pasos anteriores, se conforma la matriz de ganancia cuyo tamaño corresponder al orden del modelo analizado. La matriz de ganancia para el caso analizado se muestra a continuacion:

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{TCE} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & PDY \\ \frac{1}{PDY * HFT} & -\frac{1}{CT * HFT * PDY} & -\frac{1}{HFT} \end{bmatrix} \quad [4.3]$$

Paso #5 : En este paso se registran los datos a través del tiempo de la matriz de ganancia, las ganancias de los pathways, y los flujos netos de las variables de estado. Esto mediante la simulación del modelo en un período determinado.

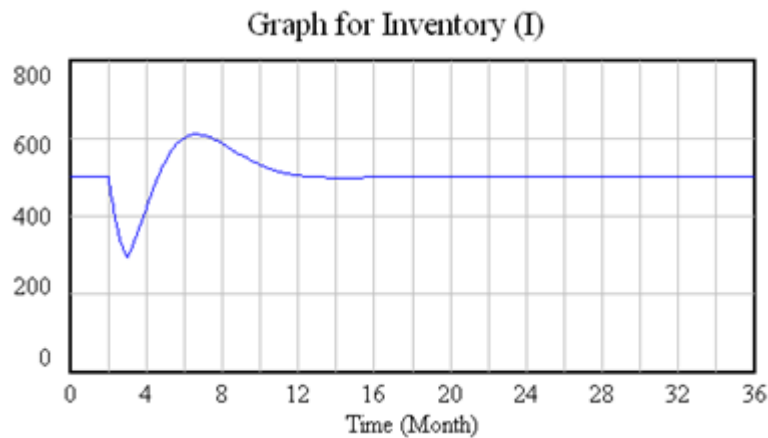


Figura 4.7: Comportamiento de la Variable Inventory

Paso #6 : En este paso se determinan las características de todos los modos elementales de comportamiento del sistema y la contribucion de cada modo de comportamiento al comportamiento de la variable de estado de interés, tal como se muestra en la Figura 4.8. En dicha figura se muestra el comportamiento de la parte real e imaginaria de los eigenvalores a lo largo del periodo de simulación.

Paso #7 : En esta etapa, se calculan las elasticidades de los eigenvalores respecto a los arcos compactos de la matriz de ganancias. Por tanto, cada modo de comportamiento tiene una matriz que representa las elasticidades respectivas, tal como se puede apreciar a continuacion donde se muestra las elasticidades asociadas a los pares conjugados en los eigenvalores del sistema.

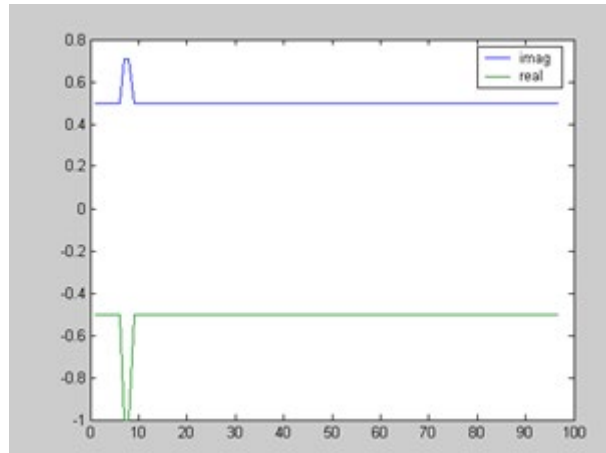
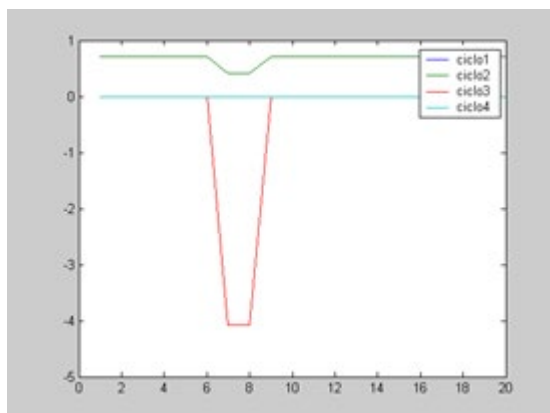
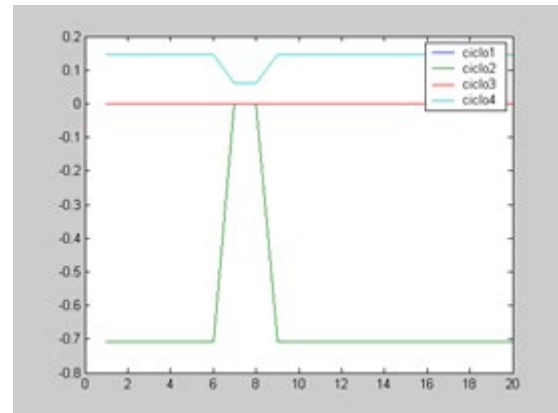


Figura 4.8: Comportamiento de los Eigenvalores



(Parte Real)



(Parte imaginaria)

Figura 4.9: Elasticidad de los Eigenvalores

Paso #8 : Este octavo paso consiste en el calculo de las ganancias de cada pathway.

Ganancia de los Pathways:

- $\text{Pathway}_1 : -1/T \text{ CE}$
- $\text{Pathways}_2 : 0$
- $\text{Pathways}_3 : P \text{ DY}$
- $\text{Pathways}_4 : 1/HF \text{ T}$
- $\text{Pathways}_5 : -1/(CT * P \text{ DY} * HF \text{ T})$
- $\text{Pathways}_6 : -1/HF \text{ T}$

Paso #9 : Se construye la matriz de ciclo dirigida, la cual relaciona los arcos identificados en el segundo paso y los loops identificados en el paso número tres. Dicha matriz se muestra a continuación.

$$DP S = \begin{matrix} & \square & & \square \\ & 00001000000 & & \\ \square & & & \\ \square & & & \\ \square & 00000000010 & & \\ \square & & & \\ \square & 00000001000 & & \\ \square & & & \\ \square & 00110010101 & & \end{matrix} \quad [4.4]$$

Paso #10 : Finalmente, se calculan y grafican las elasticidades globales a lo largo del tiempo, con el fin de evaluar los resultados obtenidos.

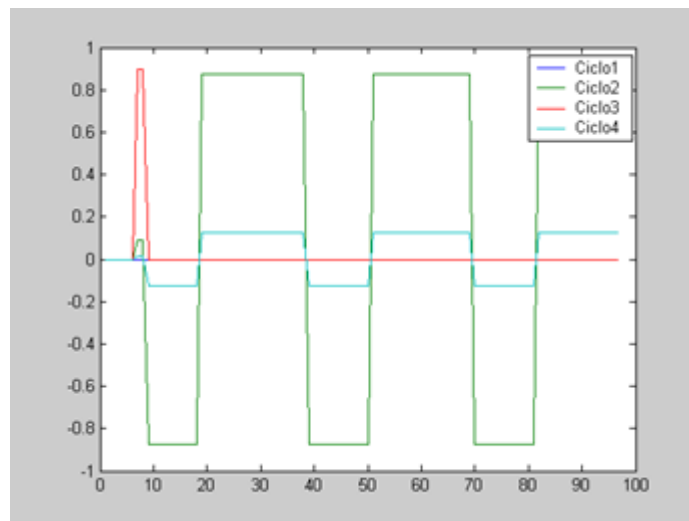


Figura 4.10: Elasticidad del Modelo Lineal de Inventarios

4.3. MODELO DE CASO DE CADENA DE SUMINISTRO

La complejidad del modelo y la multiplicidad de sus capas dificulta la presentación de sus resultados de manera ordenada, debido a que la cantidad de ciclos y pathways es muy elevada. Se encontraron 342 pathways, 229 Ciclos causales y 26 ciclos en el SILS. El Apéndice B contiene la lista de dichos ciclos. Los valores de la matriz de ganancias y la ganancia de los pathways fueron encontrados mediante el método de aproximación numérica de la derivada parcial, por lo tanto sus ecuaciones no se encuentran disponibles.

Usando la herramienta diseñada se encontraron los siguientes resultados: El modelo contiene 10 variables de estado, lo que significa que analizaremos una matriz de ganancias de dimensiones 10×10 , y que como resultado tendremos 10 valores propios en cada instante de tiempo. Para este modelo en particular encontramos que solo dos de los valores propios están asociados a un par conjugado como se muestran en la Figura 42. El comportamiento de los valores propios se muestra a continuación:

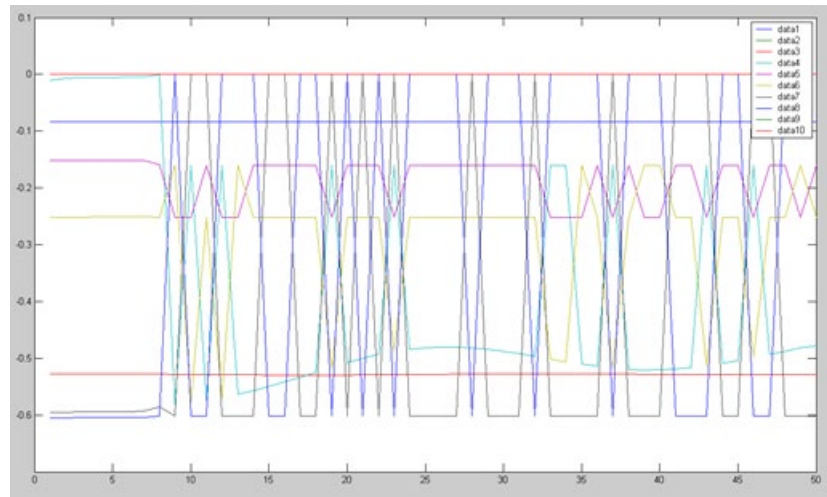


Figura 4.11: Comportamiento de la Parte Real de los Valores Propios

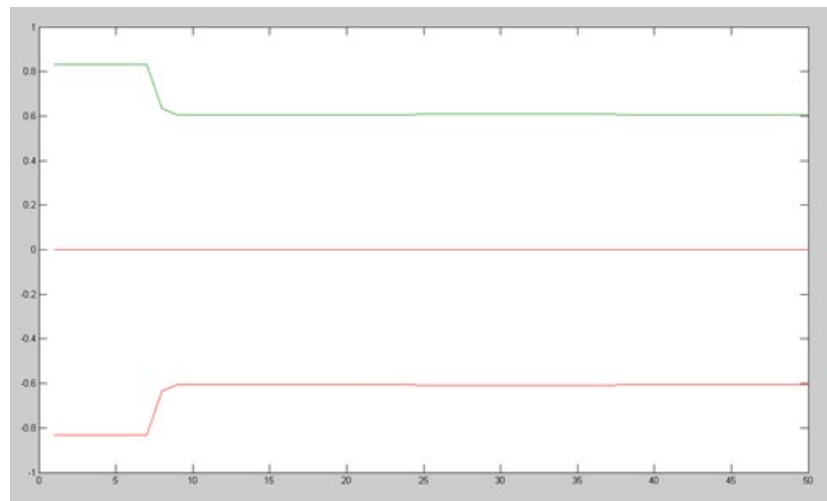


Figura 4.12: Comportamiento de la Parte Imaginaria de los Valores Propios

Finalmente se obtuvieron los valores de la elasticidad de los ciclos del SILS. Los resultados de la elasticidad del modelo se muestran a continuación:

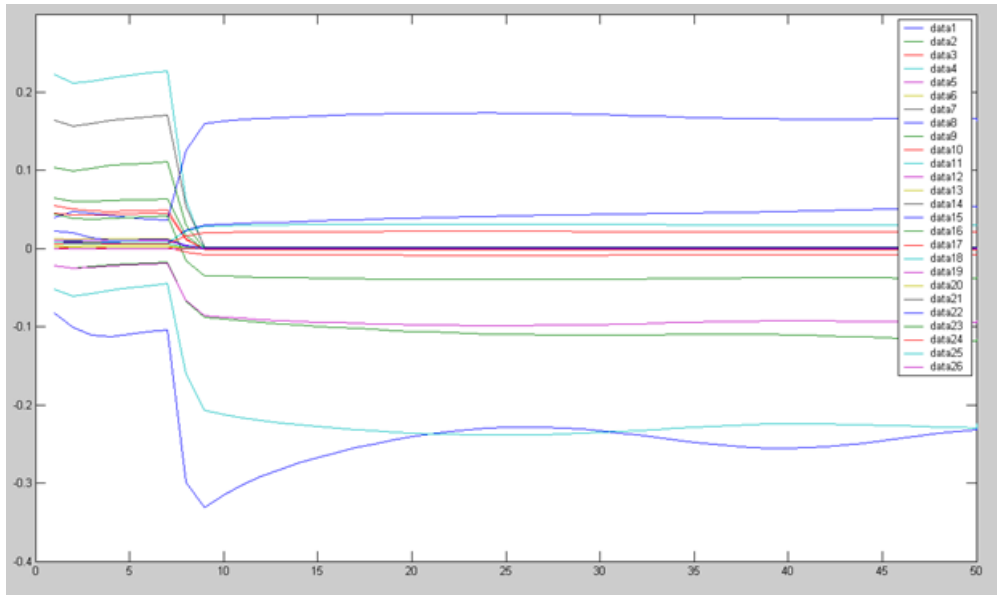


Figura 4.13: Parte Real de la Elasticidad

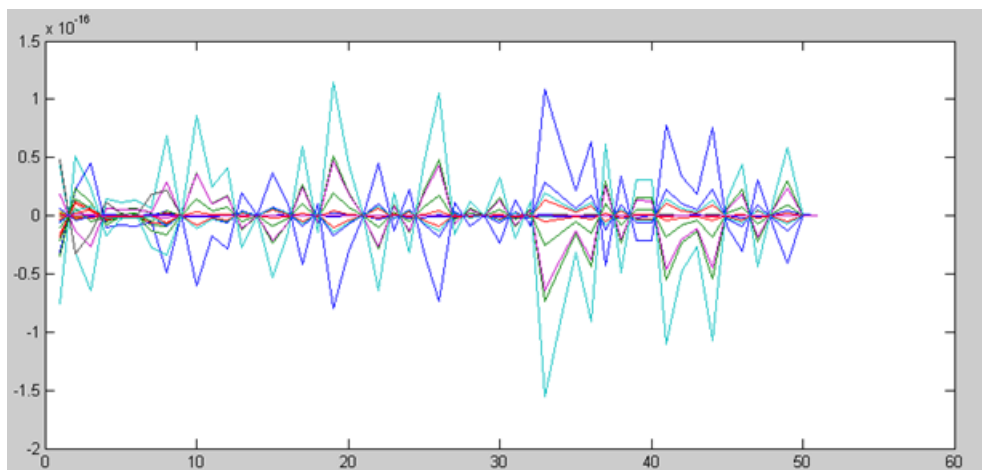


Figura 4.14: Parte Imaginaria de la Elasticidad

Podemos ver que la parte imaginaria de la elasticidad sobre los loops del modelo es practicamente cero (con una maxima amplitud de $-1,5 \times 10^{-16}$, Figura 4.14). Las pequeñas variaciones mostradas en la Figura 4.14 se pueden considerar un ruido generado por la aproximacion de las derivadas para encontrar los valores de la matriz de ganancias.

CAPÍTULO 5

VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA

En el Capítulo 4 se se analizaron tres modelos de simulacion continua usando la herramienta diseñada. Finalmente, vamos a usar los resultados obtenidos en Seccion 4.1 y Seccion 4.2 para validar los resultados entregados por la herramienta. Para esto vamos a comparar los resultados obtenidos en este proyecto con los resultados obtenidos previamente por Güneralp (2006) y Goncalves (2008). El modelo en la Seccion 4.3 no ha sido analizado previamente usando LEEA, por lo que no ser utilizado en la validación. Afortunadamente, los modelos utilizados por Güneralp y Goncalves se encuentran disponibles en la literatura, por lo que la manera más rápida pero ademas mas precisa e intuitiva es comparar las series de datos de las ganancias para cada instante de tiempo mediante el uso de simulación. El proceso utilizado para validar las series de datos se muestra en la Figura 5.1.

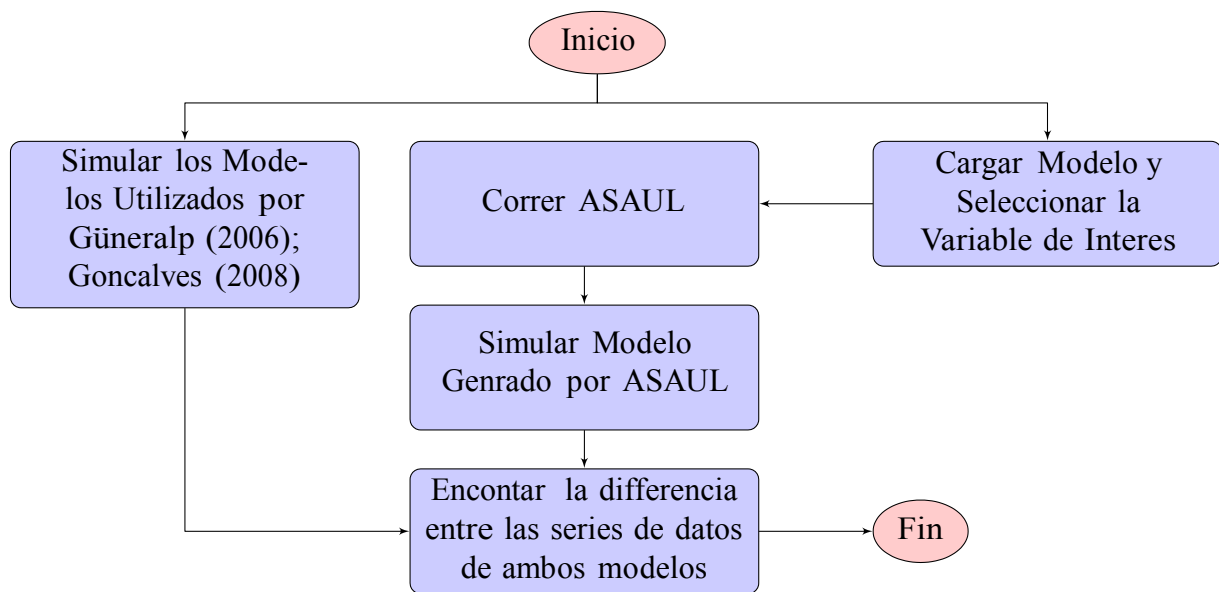


Figura 5.1: Diagrama de Flujo para Validacion de la Herramienta

5.1. MODELO PREDADOR PRESA

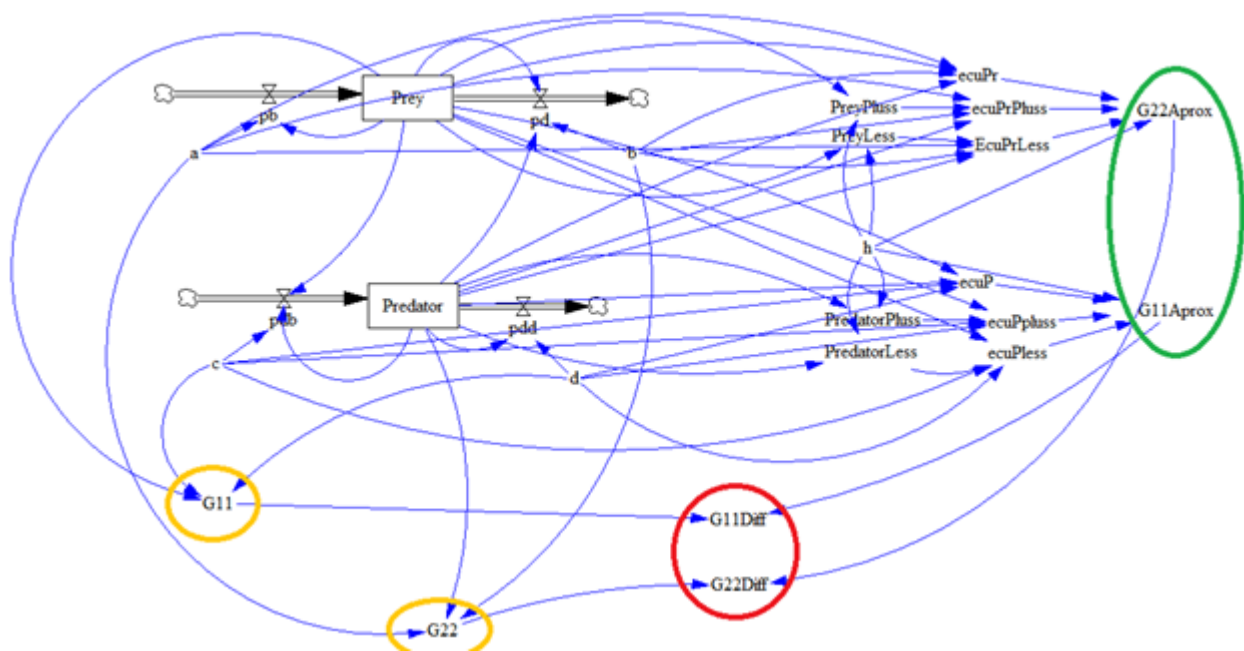


Figura 5.2: Modelo Predador-Presa para Validacion

El modelo en la Figura 5.2 es una muestra grafica de cómo se maneja el proceso de validación. En este modelo solo se muestra la validacion de dos de los valores de la matriz de ganancias. Esto se debe a que la generacion de los modelos de validacion se hace de forma automatica en formato “mdl” de vensim y no tiene representacion grafica mediante

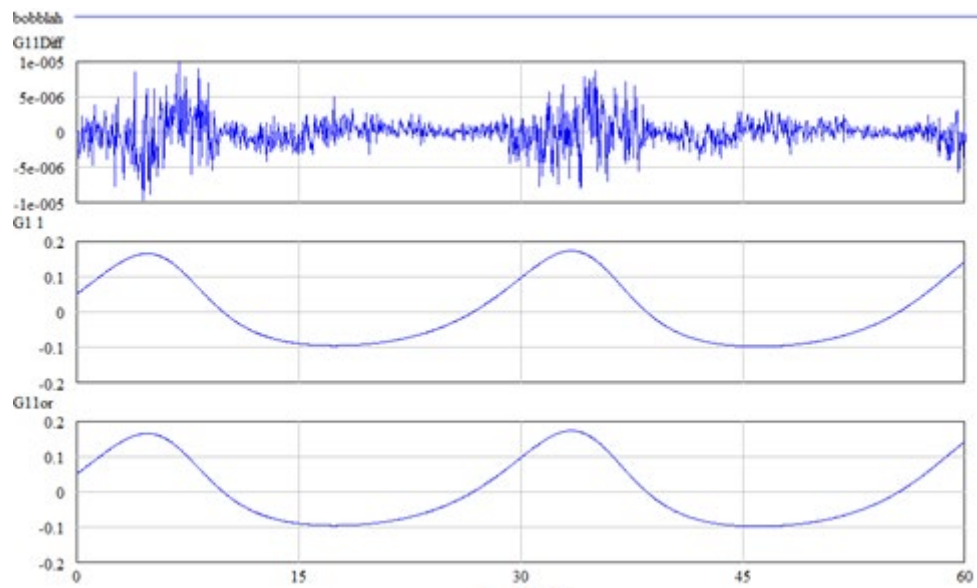


Figura 5.3: Validacion de la Variable G11

el uso de cadenas de caracteres. El modelo resultante contiene toda la información de las ecuaciones y los vínculos en forma de texto. La Figura 5.2 fue generada a mano para mostrar el proceso de validacion.

Las variables encerradas en círculos amarillos llamadas G11 y G22 en la Figura 5.2 son las variables que contiene las ecuaciones encontradas por Güneralp (2006); las ecuaciones encerradas en el círculo verde corresponden a las ecuaciones encontradas por la herramienta ASAUL, las cuales son utilizadas para encontrar el valor aproximado de las derivadas del sistema. Finalmente las ecuaciones en rojo son la diferencia entre las generadas por la herramienta y las encontradas por Güneralp.

El modelo de validacion realiza la comparacion de la matriz de ganancias completa y las ganancias de los pathways. Como ejemplo ilustraremos el resultado de la variable G11.

En la Figura 5.3 se muestran las variables G11or (derivada no aproximada). La variable G11 es la aproximacion y G11Diff es la diferencia entre ambas. De la grafica de G11Diff podemos concluir que el máximo error entre el valor real y la aproximacion se encuentra en 0.00001 que corresponde al 0.005% del maximo valor de la variable G11or. Este error presenta una media de $-5,27 \times 10^{-8}$ y una varianza de $4,23 \times 10^{-12}$. El resto de variables analizadas en el modelo de validacion presentaron un comportamiento parecido:

un error centralizado y cuyo valor promedio es insignificante comparado con los valores de las variables. Un resumen del comportamiento de estas variables se encuentra resumido en la Tabla 5.1. Los resultados graficos se encunetran en el Apendice C.1.

| Variable | Promedio (10^{-8}) | Varianza (10^{-12}) |
|----------|------------------------|-------------------------|
| G11 | -5.27 | 4.23 |
| G21 | -0.70 | 3.57 |
| G12 | -2.25 | 1.11 |
| G22 | 3.45 | 0.37 |
| G p1 | -4.16 | 2.27 |
| G p2 | -0.53 | 0.30 |
| G p3 | -4.15 | 3.47 |
| G p4 | 1.64 | 3.50 |
| G p5 | 3.16 | 4.16 |
| G p6 | -0.97 | 4.91 |

Tabla 5.1: Validación Modelo Predador Presa

Como conclusion podemos decir que no encontramos ningún error significativo entre los valores reales y la aproximacion numérica de la derivada.

5.2. MODELO LINEAL DE INVENTARIOS

De igual manera que con el modelo cazador presa, se generó un modelo de validacion para el modelo lineal de inventarios. Los resultados encontrados fueron similares al caso anterior. Dichos resultados se muestran en la Tabla 5.2 (ver Apéndice C.2).

| Variable | Promedio (10^{-5}) | Varianza (10^{-8}) |
|----------|---------------------------|------------------------|
| G11 | 4.73 | 0.00 |
| G12 | 0.00 | 0.00 |
| G13 | 0.00 | 0.00 |
| G21 | 0.00 | 0.00 |
| G22 | 0.04 | 0.001 |
| G23 | 1.57 | 2.36 |
| G31 | 4.42 | 3.25 |
| G32 | -0.77 | 4.47 |
| G33 | -4.44 | 2.44 |
| G p1 | -1.45 | 1.40 |
| G p2 | 3.82 | 3.45 |
| G p3 | -2.94 | 0.75 |
| G p4 | -1.73 | 1.48 |
| G p5 | -1.21 | 0.62 |
| G p6 | 1.37 | 1.23 |

Tabla 5.2: Validación Modelo Lineal de Inventarios

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Este documento ofrece un marco teórico sobre el método LEEA, así como sobre todos los conceptos relacionados y necesarios para el entendimiento del mismo. Se incluye una descripción detallada de los pasos enunciados en Güneralp (2006) para la ejecución del LEEA. La información disponible respecto al método LEEA y sus conceptos relacionados es bastante limitada. Por lo tanto, este marco teórico es uno de los principales aportes de este trabajo de investigación, ya que presenta de manera detallada los conceptos y principios básicos del método LEEA.

Con base en el marco teórico y mediante las funcionalidades de los software Vensim y Matlab, se pudo generar de manera exitosa una herramienta computacional autónoma, que es capaz de realizar el análisis de sensibilidad de un modelo dinámico usando el método LEEA. Los resultados de este análisis sirven como soporte a la toma de decisiones tácticas y estratégicas, en procura del mejoramiento del sistema en estudio. Además, la herramienta automatiza actividades que antes eran responsabilidades del usuario, tal como la preparación de los datos necesarios para aplicar el método LEEA. De esta manera los investigadores pueden dar mayor prioridad a analizar los resultados que a la generación de los mismos.

El motor de la herramienta ASAUL es un protocolo de comunicación entre Vensim y Matlab. Vensim es el software utilizado para la modelación y simulación de los modelos. El procesamiento principal se realiza en un software diseñado en Visual Basic. Este software se encarga de generar los modelos a ser simulados a partir del modelo original. Estos modelos son entregados en formato de Vensim. Adicionalmente este software se encarga

de organizar la información obtenida para luego ser mostrada en una interfaz gráfica de usuario. Todos los procesos matemáticos de alto nivel, como el cómputo los valores y vectores propios, son realizados en MatLab. El software diseñado en visual Basic se encarga de la comunicación con MatLab, por lo que el usuario no necesita interactuar de ninguna forma con MatLab para obtener resultados. Por último el software entrega los resultados principales en la interfaz gráfica. Adicionalmente entrega un WorkSpace de MatLab para que el usuario utilice las series de tiempo a su criterio.

Tres modelos fueron analizados utilizando la herramienta: el modelo “cazador presa”, “modelo lineal de inventarios” y “modelo de caso de cadena de suministro”. Los dos primeros modelos fueron utilizados para propósitos de verificación y validación de la herramienta. De manera muy conveniente los resultados del análisis por el método LEEA para estos dos modelos se encuentran publicados de manera detallada en Güneralp (2006) y Gonçalves (2006) respectivamente. Mediante la comparación de los resultados obtenidos por Güneralp y Gonçalves y los resultados entregados por la herramienta computacional, se pudo concluir que la herramienta funciona de forma correcta. Estos modelos fueron utilizados para una validación en dos fases: en la primera fase se validó la aproximación utilizada para encontrar las derivadas de la matriz de ganancias y de la ganancia de los pathways. Esto fue posible debido a que las ecuaciones de estas ganancias se encontraban publicadas en Güneralp (2006) y Gonçalves (2006) y podían ser añadidas de forma directa al modelo original. Una vez validada la aproximación, en la segunda fase se validaron los resultados finales entregados por ASAUL comparándolos con los publicados en Güneralp (2006) y Gonçalves (2006).

El tercer modelo analizado se utilizó para verificar la escalabilidad de nuestra herramienta, dado que su tamaño es considerablemente mayor que el de los dos primeros modelos. Nuestros resultados nos permiten concluir que nuestra herramienta trabaja de manera estable para modelos de gran tamaño.

Una de las limitaciones del método LEEA es que, debido a que las ecuaciones de ganancias se obtienen mediante derivadas parciales, el método no podía ser aplicado a modelos cuyas ecuaciones contuvieran discontinuidades o derivadas indefinidas. Uno de

los aportes mas significativos de nuestra investigacion, es que se logr superar dicha limitacion a través de una metodología de aproximacion para el cálculo de las derivadas parciales. Esto se consiguió generando un modelo que contiene al modelo original y que adicionalmente copia todos los pathways originales, pero en desfase. Este modelo es simulado y los valores de las copias son usados para encontrar las derivadas numéricas de la matriz de ganancia y los pathways.

La complejidad algorítmica del software puede ser mejorada en futuras versiones del mismo, pues muchas de las subrutinas utilizadas resultan redundantes. El diseño propuesto en esta monografía tiene como base la metodología de diez pasos de Güneralp. Debido a esto, se trabajó cada paso de manera independiente y los resultados de cada paso se utilizan para el desarrollo del siguiente. Por lo tanto, el software se mueve sobre el modelo un mayor número de veces que lo necesario. Se recomienda que para futuras versiones se estudie a profundidad los algoritmos propuestos y se decida cuáles pueden ser integrados para evitar corridas redundantes, lo que mejoraría le tiempo de solución. También se sugiere un entorno de programacion mas flexible y una estructura de datos mas robusta. Optimizar los algoritmos y moverse a un entorno de programación mas flexible, permitiría adicionar un modulo a la interfaz grafica en el que el usuario pueda ver de manera detallada los resultados del sistema sin tener que utilizar MatLab.

APÉNDICES

APÉNDICE A

DEFINICIONES IMPORTANTES

- **Vector Propio (Eigenvector):** un Vector Propio es la representacion vectorial de las transformaciones realizadas a un sistema. Los Vectores Propios de una matriz pueden ser encontrados resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Ax = \lambda x \quad [A.1]$$

donde x son los vectores propios de la matriz A y λ sus valores propios.

- **Valor Propio (Eigenvalor):** un Valor Propio es el valor por el cual un Vector Propio es escalado para representar una transformacion del sistema (λ ver definicioon de Vector Propio).
- **variables del Sistema:** las variables del sistema son todas las variables que hacen parte de un sistema dinámico. Incluyen: constantes, variables de estado, variables de flujo y variables intermedias.
- **Elasticidad:** La Elasticidad cuantifica la variación de una variable respecto a cambios en otra.
- **Variable de Estado:** las Variables de Estado son un conjunto de variables que describen el estado matematico de un sistema dinamico.
- **Variable de Flujo:** Variable que controla el flujo hacia y desde las variables de estado.

- **Matriz de Adyacencia:** la Matriz de Adyacencia es una representación matricial binaria de las relaciones directas del sistema. Un 1 en la celda ij representa un arco de i a j .
- **Matriz de Accesibilidad:** la Matriz de Accesibilidad es una matriz binaria que indica si hay un camino (no necesariamente directo) entre dos variables. Si la celda ij es igual a 1 existe un camino entre la variable i y la variable j .
- **Circuito Geodésico:** un Circuito Geodésico es el camino con el menor número de arcos entre dos variables del sistema.
- **Matriz de Distancias:** la celda ij de la Matriz de Distancias contiene la longitud del Circuito Geodésico entre i y j .
- **Pathway:** camino que va de una variable de estado a otra y cuyos nodos intermedios no son variables de estado.
- **Vínculo Causal (Causal Link):** un Vínculo Causal entre A y B representa una relación entre A y B donde A precede a B . En el entorno del LEEA solo se consideran los vínculos causales que estén relacionados a una o más variables de flujo, y que no contengan constantes.

APÉNDICE B

RESULTADOS MODELO DE CASO DE CADENA DE SUMINISTROS

B.1. PATHWAYS

- Pathway₁ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate → Export Backlog
- Pathway₂ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate → Export Backlog
- Pathway₃ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Shipment Rate → Export Inventory
- Pathway₄ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Inventory
- Pathway₅ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Export Inventory
- Pathway₆ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Export Inventory

- Pathway₇ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Local Inventory
- Pathway₈ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Local Inventory
- Pathway₉ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₀ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₁ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₂ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₃ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast

- Pathway₁₄ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₅ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₆ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₇ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₈ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₉ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₀ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start

Rate \rightarrow Production Plan \rightarrow Desired Material Usage Rate \rightarrow Material Usage Rate \rightarrow Materials Inventory

- Pathway₂₁ : Export Backlog \rightarrow Desired Export Inventory \rightarrow Adjustment from Export Inventory \rightarrow Desired Export Production \rightarrow Desired WIP \rightarrow Desired Production Start Rate \rightarrow Production Plan \rightarrow Desired Material Usage Rate \rightarrow Material Usage Ratio \rightarrow Material Usage Rate \rightarrow Materials Inventory
- Pathway₂₂ : Export Backlog \rightarrow Desired Export Shipment Rate \rightarrow Desired Export Production \rightarrow Desired WIP \rightarrow Adjustment for WIP \rightarrow Desired Production Start Rate \rightarrow Production Plan \rightarrow Desired Material Usage Rate \rightarrow Material Usage Ratio \rightarrow Material Usage Rate \rightarrow Materials Inventory
- Pathway₂₃ : Export Backlog \rightarrow Desired Export Inventory \rightarrow Adjustment from Export Inventory \rightarrow Desired Export Production \rightarrow Desired WIP \rightarrow Adjustment for WIP \rightarrow Desired Production Start Rate \rightarrow Production Plan \rightarrow Desired Material Usage Rate \rightarrow Material Usage Rate \rightarrow Materials Inventory
- Pathway₂₄ : Export Backlog \rightarrow Desired Export Shipment Rate \rightarrow Desired Export Production \rightarrow Desired WIP \rightarrow Desired Production Start Rate \rightarrow Production Plan \rightarrow Desired Material Usage Rate \rightarrow Desired Material Delivery Rate \rightarrow Compromised Material Delivery Rate \rightarrow Material Delivery Rate \rightarrow Materials Inventory
- Pathway₂₅ : Export Backlog \rightarrow Desired Export Inventory \rightarrow Adjustment from Export Inventory \rightarrow Desired Export Production \rightarrow Desired WIP \rightarrow Adjustment for WIP \rightarrow Desired Production Start Rate \rightarrow Production Plan \rightarrow Desired Material Usage Rate \rightarrow Material Usage Ratio \rightarrow Material Usage Rate \rightarrow Materials Inventory
- Pathway₂₆ : Export Backlog \rightarrow Desired Export Inventory \rightarrow Adjustment from Export Inventory \rightarrow Desired Export Production \rightarrow Desired WIP \rightarrow Desired Production Start Rate \rightarrow Production Plan \rightarrow Desired Material Usage Rate \rightarrow Desired Material Delivery Rate \rightarrow Compromised Material Delivery Rate \rightarrow Material Delivery Rate \rightarrow Materials Inventory

- Pathway₂₇ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₈ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₉ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₀ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₁ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₂ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start

Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory

- Pathway₃₃ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₄ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₅ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₆ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory

- Pathway₃₇ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₈ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₉ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₄₀ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₄₁ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₄₂ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Shipment Rate → Export Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₄₃ : Export Backlog → Export Delivery Delay → Export Lost Shipment Cost Fraction → Export Lost Shipment Unit Cost → Export Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₄₄ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₄₅ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₄₆ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₄₇ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₄₈ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₄₉ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate → Export Delivery Delay → Export Lost Shipment Cost Fraction → Export Lost Shipment Unit Cost → Export Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₅₀ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate → Export Delivery Delay → Export Lost Shipment Cost Fraction → Export Lost Shipment Unit Cost → Export Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₅₁ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₅₂ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₅₃ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₅₄ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₅₅ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired

Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₅₆ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₅₇ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₅₈ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₅₉ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₆₀ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₆₁ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₆₂ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₆₃ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₆₄ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₆₅ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit

Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₆₆ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₆₇ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₆₈ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₆₉ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₇₀ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start

Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₇₁ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₇₂ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₇₃ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₇₄ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₇₅ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₇₆ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₇₇ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₇₈ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₇₉ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired

Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₈₀ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₈₁ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₈₂ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₈₃ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Shipment Rate → Income Rate → Revenue
- Pathway₈₄ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Shipment Rate → Export Price → Income Rate → Revenue

- Pathway₈₅ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Income Rate → Revenue
- Pathway₈₆ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Price → Income Rate → Revenue
- Pathway₈₇ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₈₈ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₈₉ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₉₀ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₉₁ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₉₂ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory

- Pathway₉₃ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₉₄ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₉₅ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₉₆ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₉₇ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₉₈ : Export Backlog → Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment

for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory

- Pathway₉₉ : Export Inventory → Maximum Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate → Export Backlog
- Pathway₁₀₀ : Export Inventory → Maximum Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Inventory
- Pathway₁₀₁ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Export Inventory
- Pathway₁₀₂ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Local Inventory
- Pathway₁₀₃ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₀₄ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₀₅ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast

- Pathway₁₀₆ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₀₇ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₀₈ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₀₉ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₁₀ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₁₁ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory

- Pathway₁₁₂ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₁₃ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₁₄ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₁₅ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₁₆ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₁₇ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Pro-

duction Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory

- Pathway₁₁₈ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₁₉ : Export Inventory → Export Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₂₀ : Export Inventory → Maximum Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₂₁ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₁₂₂ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₁₂₃ : Export Inventory → Maximum Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate → Export Delivery Delay → Export Lost Shipment Cost Fraction → Export Lost Shipment Unit Cost → Export Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₁₂₄ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₂₅ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₂₆ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₂₇ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₂₈ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₂₉ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Produc-

tion Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₁₃₀ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₃₁ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₃₂ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₃₃ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₃₄ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production

Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₁₃₅ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₃₆ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₃₇ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₃₈ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₁₃₉ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₄₀ : Export Inventory → Maximum Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Income Rate → Revenue
- Pathway₁₄₁ : Export Inventory → Maximum Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Price → Income Rate → Revenue
- Pathway₁₄₂ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₁₄₃ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₁₄₄ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₁₄₅ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory

- Pathway₁₄₆ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₁₄₇ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₁₄₈ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Shipment Rate → Local Fulfillment Rate → Local Backlog
- Pathway₁₄₉ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Fulfillment Rate → Local Backlog
- Pathway₁₅₀ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Shipment Rate → Local Inventory
- Pathway₁₅₁ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Inventory
- Pathway₁₅₂ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₅₃ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Shipment Rate → Local Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₅₄ : Local Backlog → Local Delivery Delay → Local Lost Shipment Cost Fraction → Local Lost Shipment Unit Cost → Local Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₁₅₅ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₅₆ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Shipment Rate → Local Fulfillment Rate → Local Delivery Delay → Local Lost Shipment Cost Fraction → Local Lost Shipment Unit Cost → Local Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₅₇ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Fulfillment Rate → Local Delivery Delay → Local Lost Shipment Cost Fraction → Local Lost Shipment Unit Cost → Local Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₁₅₈ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Shipment Rate → Income Rate → Revenue
- Pathway₁₅₉ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Shipment Rate → Local Price → Income Rate → Revenue
- Pathway₁₆₀ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Income Rate → Revenue
- Pathway₁₆₁ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Price → Income Rate → Revenue
- Pathway₁₆₂ : Local Forecast → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Export Inventory
- Pathway₁₆₃ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Export Inventory
- Pathway₁₆₄ : Local Forecast → Change in Fcasted Orders → Local Forecast

- Pathway₁₆₅ : Local Forecast → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Local Inventory
- Pathway₁₆₆ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Local Inventory
- Pathway₁₆₇ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₆₈ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₆₉ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₇₀ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₇₁ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₇₂ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage

Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast

- Pathway₁₇₃ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₇₄ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₁₇₅ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₇₆ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₇₇ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₇₈ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₇₉ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start

Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate
→ Materials Inventory

- Pathway₁₈₀ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₈₁ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₈₂ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₈₃ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₈₄ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₈₅ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory

- Pathway₁₈₆ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₈₇ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₈₈ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₈₉ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₉₀ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₉₁ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate

- Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₉₂ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
 - Pathway₁₉₃ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
 - Pathway₁₉₄ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
 - Pathway₁₉₅ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
 - Pathway₁₉₆ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP →

Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate
 → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory

- Pathway₁₉₇ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₉₈ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₁₉₉ : Local Forecast → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₂₀₀ : Local Forecast → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₂₀₁ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs

- Pathway₂₀₂ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₂₀₃ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₀₄ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₀₅ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₀₆ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₀₇ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₀₈ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production

Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₂₀₉ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₁₀ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₁₁ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₁₂ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₁₃ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₂₁₄ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₁₅ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₁₆ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₁₇ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₁₈ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₁₉ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production

Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₂₂₀ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₂₁ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₂₂ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₂₃ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₂₂₄ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₂₅ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₂₆ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₂₇ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₂₈ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate

→ Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₂₂₉ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₃₀ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₃₁ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₃₂ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₃₃ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP →

Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate
 → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired
 Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit
 Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost
 Rate → Operating Costs

- Pathway₂₃₄ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local
 Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP →
 Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate
 → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired
 Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Pay-
 ment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost
 Rate → Operating Costs
- Pathway₂₃₅ : Local Forecast → Desired Local Production → Relation Between
 Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Work in Process
 Inventory
- Pathway₂₃₆ : Local Forecast → Desired Local Production → Relation Between
 Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Work in Process
 Inventory
- Pathway₂₃₇ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local
 Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions
 → Production Rate For Local Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₂₃₈ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local
 Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions
 → Production Rate For Export Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₂₃₉ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP →
 Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate

→ Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory

- Pathway₂₄₀ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₂₄₁ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₂₄₂ : Local Forecast → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₂₄₃ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₂₄₄ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₂₄₅ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP →

Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate
 → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production
 Start Rate → Work in Process Inventory

- Pathway₂₄₆ : Local Forecast → Desired Local Inventory → Adjustment from Local
 Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP →
 Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate
 → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts
 from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₂₄₇ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Lo-
 cal Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For
 Export Orders → Export Inventory
- Pathway₂₄₈ : Local Inventory → Maximum Local Shipment Rate → Local Or-
 der Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Fulfillment Rate → Local
 Backlog
- Pathway₂₄₉ : Local Inventory → Maximum Local Shipment Rate → Local Order
 Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Inventory
- Pathway₂₅₀ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local
 Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local
 Orders → Local Inventory
- Pathway₂₅₁ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Lo-
 cal Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production
 Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in
 Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₂₅₂ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local
 Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan
 → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate
 → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast

- Pathway₂₅₃ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₂₅₄ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₂₅₅ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₅₆ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₅₇ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₅₈ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₅₉ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory

- Pathway₂₆₀ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₆₁ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₆₂ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₆₃ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₆₄ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₆₅ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan

- Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₆₆ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
 - Pathway₂₆₇ : Local Inventory → Local Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
 - Pathway₂₆₈ : Local Inventory → Maximum Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
 - Pathway₂₆₉ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
 - Pathway₂₇₀ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
 - Pathway₂₇₁ : Local Inventory → Maximum Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Fulfillment Rate → Local Delivery Delay → Local Lost Shipment Cost Fraction → Local Lost Shipment Unit Cost → Local Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
 - Pathway₂₇₂ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan

→ Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₂₇₃ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₇₄ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₇₅ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₇₆ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₇₇ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₂₇₈ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₇₉ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₈₀ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₈₁ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₈₂ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay

→ Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₂₈₃ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₈₄ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₈₅ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₈₆ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₂₈₇ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start

Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₂₈₈ : Local Inventory → Maximum Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Income Rate → Revenue
- Pathway₂₈₉ : Local Inventory → Maximum Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate → Local Price → Income Rate → Revenue
- Pathway₂₉₀ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Local Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₂₉₁ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₂₉₂ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₂₉₃ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₂₉₄ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate

→ Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory

- Pathway₂₉₅ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₂₉₆ : Materials Forecast → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₂₉₇ : Materials Forecast → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₉₈ : Materials Forecast → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₂₉₉ : Materials Forecast → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₀₀ : Materials Forecast → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₀₁ : Materials Forecast → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₀₂ : Materials Forecast → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₃₀₃ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₃₀₄ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₀₅ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₀₆ : Materials Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₀₇ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₀₈ : Materials Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₀₉ : Materials Inventory → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₁₀ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₁₁ : Materials Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₃₁₂ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₁₃ : Materials Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₁₄ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₁₅ : Materials Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₁₆ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₁₇ : Materials Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₁₈ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₃₁₉ : Work in Process Inventory → Maximum Production Rate → Production Rate For Export Orders → Export Inventory

- Pathway₃₂₀ : Work in Process Inventory → Maximum Production Rate → Production Rate For Local Orders → Local Inventory
- Pathway₃₂₁ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₃₂₂ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- Pathway₃₂₃ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₂₄ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₂₅ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₂₆ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₂₇ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired

Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory

- Pathway₃₂₈ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Inventory
- Pathway₃₂₉ : Work in Process Inventory → Maximum Production Rate → Production Rate For Local Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₃₃₀ : Work in Process Inventory → Maximum Production Rate → Production Rate For Export Orders → Total Production → Processing Costs Rate → Operating Costs
- Pathway₃₃₁ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₃₂ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₃₃ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₃₃₄ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₃₅ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₃₆ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₃₇ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price → Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate → Operating Costs
- Pathway₃₃₈ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time → Material Delivery Rate → Materials Cost Rate → Operating Costs

- Pathway₃₃₉ : Work in Process Inventory → Maximum Production Rate → Production Rate For Local Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₃₄₀ : Work in Process Inventory → Maximum Production Rate → Production Rate For Export Orders → Work in Process Inventory
- Pathway₃₄₁ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- Pathway₃₄₂ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory

B.2. VICULOS CAUSALES

- VinculoCausal₁ : Adjusted Payment Delay → Materials Delay Time
- VinculoCausal₂ : Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate
- VinculoCausal₃ : Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate
- VinculoCausal₄ : Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production
- VinculoCausal₅ : Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production
- VinculoCausal₆ : Compromised Material Delivery Rate → Adjusted Payment Delay
- VinculoCausal₇ : Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate
- VinculoCausal₈ : Compromised Material Delivery Rate → Material Unit Price

- VinculoCausal₉ : Demand Amplification Material Delivery → Constrain 1
- VinculoCausal₁₀ : Demand Amplification Production Start Rate → Constrain 2
- VinculoCausal₁₁ : Desired Export Inventory → Adjustment from Export Inventory
- VinculoCausal₁₂ : Desired Export Production → Desired WIP
- VinculoCausal₁₃ : Desired Export Production → Relation Between Desired Productions
- VinculoCausal₁₄ : Desired Export Shipment Rate → Desired Export Production
- VinculoCausal₁₅ : Desired Export Shipment Rate → Export Lost Shipment Cost
- VinculoCausal₁₆ : Desired Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio
- VinculoCausal₁₇ : Desired Export Shipment Rate → Export Shipment Rate
- VinculoCausal₁₈ : Desired Local Inventory → Adjustment from Local Inventory
- VinculoCausal₁₉ : Desired Local Inventory Coverage → Desired Local Inventory
- VinculoCausal₂₀ : Desired Local Production → Desired WIP
- VinculoCausal₂₁ : Desired Local Production → Relation Between Desired Productions
- VinculoCausal₂₂ : Desired Local Shipment Rate → Local Lost Shipment Cost
- VinculoCausal₂₃ : Desired Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio
- VinculoCausal₂₄ : Desired Local Shipment Rate → Local Shipment Rate
- VinculoCausal₂₅ : Desired Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate
- VinculoCausal₂₆ : Desired Material Inventory → Adjustment for Material Inventory

- VinculoCausal₂₇ : Desired Material Inventory Coverage → Desired Material Inventory
- VinculoCausal₂₈ : Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate
- VinculoCausal₂₉ : Desired Material Usage Rate → Desired Material Inventory
- VinculoCausal₃₀ : Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate
- VinculoCausal₃₁ : Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio
- VinculoCausal₃₂ : Desired Production Start Rate → Production Plan
- VinculoCausal₃₃ : Desired WIP → Adjustment for WIP
- VinculoCausal₃₄ : Desired WIP → Desired Production Start Rate
- VinculoCausal₃₅ : Export Backlog → Desired Export Inventory
- VinculoCausal₃₆ : Export Backlog → Desired Export Shipment Rate
- VinculoCausal₃₇ : Export Backlog → Export Delivery Delay
- VinculoCausal₃₈ : Export Delivery Delay → Export Lost Shipment Cost Fraction
- VinculoCausal₃₉ : Export Demand Amplification Production Rate → Constrain 5
- VinculoCausal₄₀ : Export Demand Amplification Shipment Rate → Constrain 6
- VinculoCausal₄₁ : Export Fulfillment Rate → Export Delivery Delay
- VinculoCausal₄₂ : Export Holding Cost → Inventory Cost Rate
- VinculoCausal₄₃ : Export Holding Unit Cost → Export Holding Cost
- VinculoCausal₄₄ : Export Inventory → Adjustment from Export Inventory
- VinculoCausal₄₅ : Export Inventory → Export Holding Cost
- VinculoCausal₄₆ : Export Inventory → Export Inventory Coverage

- VinculoCausal₄₇ : Export Inventory → Maximum Export Shipment Rate
- VinculoCausal₄₈ : Export Inventory → Total Inventory
- VinculoCausal₄₉ : Export Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate
- VinculoCausal₅₀ : Export Lost Shipment Cost Fraction → Export Lost Shipment Unit Cost
- VinculoCausal₅₁ : Export Lost Shipment Unit Cost → Export Lost Shipment Cost
- VinculoCausal₅₂ : Export Mnfg Input → Incoming Export Orders
- VinculoCausal₅₃ : Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate
- VinculoCausal₅₄ : Export Order Rate → "LOR/EOR"
- VinculoCausal₅₅ : Export Price → Income Rate
- VinculoCausal₅₆ : Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate
- VinculoCausal₅₇ : Export Shipment Rate → Export Inventory Coverage
- VinculoCausal₅₈ : Export Shipment Rate → Export Lost Shipment Cost
- VinculoCausal₅₉ : Export Shipment Rate → Export Price
- VinculoCausal₆₀ : Export Shipment Rate → Income Rate
- VinculoCausal₆₁ : Export Shipment Rate → Normal Value Export Shipment Rate
- VinculoCausal₆₂ : Export Shipment Rate → Peak Value Export Shipment Rate
- VinculoCausal₆₃ : Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate
- VinculoCausal₆₄ : Height → Stepp
- VinculoCausal₆₅ : Height 0 → Stepp 0
- VinculoCausal₆₆ : Income Rate → Profit Rate

- VinculoCausal₆₇ : Incoming Export Orders → Export Order Rate
- VinculoCausal₆₈ : Incoming Export Orders → Normal Value Incoming Export Orders
- VinculoCausal₆₉ : Incoming Export Orders → Normal Value Total Orders
- VinculoCausal₇₀ : Incoming Export Orders → Peak Value Incoming Export Orders
- VinculoCausal₇₁ : Incoming Export Orders → Peak Value Total Orders
- VinculoCausal₇₂ : Incoming Local Orders → Change in Forecasted Orders
- VinculoCausal₇₃ : Incoming Local Orders → Local Order Rate
- VinculoCausal₇₄ : Incoming Local Orders → Normal Value Incoming Local Orders
- VinculoCausal₇₅ : Incoming Local Orders → Normal Value Total Orders
- VinculoCausal₇₆ : Incoming Local Orders → Peak Value Incoming Local Orders
- VinculoCausal₇₇ : Incoming Local Orders → Peak Value Total Orders
- VinculoCausal₇₈ : Increase Export Shipment Rate → Export Demand Amplification Shipment Rate
- VinculoCausal₇₉ : Increase Incoming Export Orders → Export Demand Amplification Production Rate
- VinculoCausal₈₀ : Increase Incoming Export Orders → Export Demand Amplification Shipment Rate
- VinculoCausal₈₁ : Increase Incoming Local Orders → Local Demand Amplification Production Rate
- VinculoCausal₈₂ : Increase Incoming Local Orders → Local Demand Amplification Shipment Rate

- VinculoCausal₈₃ : Increase Local Shipment Rate → Local Demand Amplification Shipment Rate
- VinculoCausal₈₄ : Increase Material Delivery Rate → Demand Amplification Material Delivery
- VinculoCausal₈₅ : Increase Production Rate Export Orders → Export Demand Amplification Production Rate
- VinculoCausal₈₆ : Increase Production Rate Local Orders → Local Demand Amplification Production Rate
- VinculoCausal₈₇ : Increase Production Start Rate → Demand Amplification Production Start Rate
- VinculoCausal₈₈ : Increase Total Orders → Demand Amplification Material Delivery
- VinculoCausal₈₉ : Increase Total Orders → Demand Amplification Production Start Rate
- VinculoCausal₉₀ : Inventory Cost Rate → Operating Cost Rate
- VinculoCausal₉₁ : Inventory Cost Rate → Profit Rate
- VinculoCausal₉₂ : Local Backlog → Desired Local Shipment Rate
- VinculoCausal₉₃ : Local Backlog → Local Delivery Delay
- VinculoCausal₉₄ : Local Delivery Delay → Local Lost Shipment Cost Fraction
- VinculoCausal₉₅ : Local Demand Amplification Production Rate → Constrain 3
- VinculoCausal₉₆ : Local Demand Amplification Shipment Rate → Constrain 4
- VinculoCausal₉₇ : Local Forecast → Change in Feasted Orders
- VinculoCausal₉₈ : Local Forecast → Desired Local Inventory

- VinculoCausal₉₉ : Local Forecast → Desired Local Production
- VinculoCausal₁₀₀ : Local Fulfillment Rate → Local Delivery Delay
- VinculoCausal₁₀₁ : Local Holding Cost → Inventory Cost Rate
- VinculoCausal₁₀₂ : Local Holding Unit Cost → Local Holding Cost
- VinculoCausal₁₀₃ : Local Inventory → Adjustment from Local Inventory
- VinculoCausal₁₀₄ : Local Inventory → Local Holding Cost
- VinculoCausal₁₀₅ : Local Inventory → Local Inventory Coverage
- VinculoCausal₁₀₆ : Local Inventory → Maximum Local Shipment Rate
- VinculoCausal₁₀₇ : Local Inventory → Total Inventory
- VinculoCausal₁₀₈ : Local Lost Shipment Cost → Inventory Cost Rate
- VinculoCausal₁₀₉ : Local Lost Shipment Cost Fraction → Local Lost Shipment Unit Cost
- VinculoCausal₁₁₀ : Local Lost Shipment Unit Cost → Local Lost Shipment Cost
- VinculoCausal₁₁₁ : Local Mnfg Input → Incoming Local Orders
- VinculoCausal₁₁₂ : Local Order Fulfillment Ratio → Local Shipment Rate
- VinculoCausal₁₁₃ : Local Order Rate → “LOR/EOR”
- VinculoCausal₁₁₄ : Local Price → Income Rate
- VinculoCausal₁₁₅ : Local Shipment Rate → Income Rate
- VinculoCausal₁₁₆ : Local Shipment Rate → Local Fulfillment Rate
- VinculoCausal₁₁₇ : Local Shipment Rate → Local Inventory Coverage
- VinculoCausal₁₁₈ : Local Shipment Rate → Local Lost Shipment Cost

- VinculoCausal₁₁₉ : Local Shipment Rate → Local Price
- VinculoCausal₁₂₀ : Local Shipment Rate → Normal Value Local Shipment Rate
- VinculoCausal₁₂₁ : Local Shipment Rate → Peak Value Local Shipment Rate
- VinculoCausal₁₂₂ : Material Delivery Rate → Materials Cost Rate
- VinculoCausal₁₂₃ : Material Delivery Rate → Materials Inventory
- VinculoCausal₁₂₄ : Material Delivery Rate → Normal Value Material Delivery Rate
- VinculoCausal₁₂₅ : Material Delivery Rate → Peak Value Material Delivery Rate
- VinculoCausal₁₂₆ : Material Holding Unit Cost → Materials Holding Cost
- VinculoCausal₁₂₇ : Material Unit Price → Material Holding Unit Cost
- VinculoCausal₁₂₈ : Material Unit Price → Materials Cost Rate
- VinculoCausal₁₂₉ : Material Usage Rate → Adjustment in Forecasted Material
- VinculoCausal₁₃₀ : Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials
- VinculoCausal₁₃₁ : Material Usage Rate → Materials Coverage
- VinculoCausal₁₃₂ : Material Usage Rate → Materials Inventory
- VinculoCausal₁₃₃ : Material Usage Ratio → Material Usage Rate
- VinculoCausal₁₃₄ : Materials Cost Rate → Operating Cost Rate
- VinculoCausal₁₃₅ : Materials Cost Rate → Operating Costs
- VinculoCausal₁₃₆ : Materials Cost Rate → Profit Rate
- VinculoCausal₁₃₇ : Materials Delay Time → Material Delivery Rate
- VinculoCausal₁₃₈ : Materials Forecast → Adjustment in Forecasted Material

- VinculoCausal₁₃₉ : Materials Forecast → Required Material Delivery Rate
- VinculoCausal₁₄₀ : Materials Holding Cost → Inventory Cost Rate
- VinculoCausal₁₄₁ : Materials Inventory → Adjustment for Material Inventory
- VinculoCausal₁₄₂ : Materials Inventory → Materials Coverage
- VinculoCausal₁₄₃ : Materials Inventory → Materials Holding Cost
- VinculoCausal₁₄₄ : Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate
- VinculoCausal₁₄₅ : Maximum Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio
- VinculoCausal₁₄₆ : Maximum Local Shipment Rate → Local Order Fulfillment Ratio
- VinculoCausal₁₄₇ : Maximum Material Usage Rate → Material Usage Ratio
- VinculoCausal₁₄₈ : Maximum Material Usage Rate → Required Material Delivery Rate
- VinculoCausal₁₄₉ : Maximum Production Rate → Production Rate For Export Orders
- VinculoCausal₁₅₀ : Maximum Production Rate → Production Rate For Local Orders
- VinculoCausal₁₅₁ : Normal Value Export Shipment Rate → Increase Export Shipment Rate
- VinculoCausal₁₅₂ : Normal Value Export Shipment Rate → Peak Value Export Shipment Rate
- VinculoCausal₁₅₃ : Normal Value Incoming Export Orders → Increase Incoming Export Orders

- VinculoCausal₁₅₄ : Normal Value Incoming Export Orders → Peak Value Incoming Export Orders
- VinculoCausal₁₅₅ : Normal Value Incoming Local Orders → Increase Incoming Local Orders
- VinculoCausal₁₅₆ : Normal Value Incoming Local Orders → Peak Value Incoming Local Orders
- VinculoCausal₁₅₇ : Normal Value Local Shipment Rate → Increase Local Shipment Rate
- VinculoCausal₁₅₈ : Normal Value Local Shipment Rate → Peak Value Local Shipment Rate
- VinculoCausal₁₅₉ : Normal Value Material Delivery Rate → Increase Material Delivery Rate
- VinculoCausal₁₆₀ : Normal Value Material Delivery Rate → Peak Value Material Delivery Rate
- VinculoCausal₁₆₁ : Normal Value Production Rate Export Orders → Increase Production Rate Export Orders
- VinculoCausal₁₆₂ : Normal Value Production Rate Export Orders → Peak Value Production Rate Export Orders
- VinculoCausal₁₆₃ : Normal Value Production Rate Local Orders → Increase Production Rate Local Orders
- VinculoCausal₁₆₄ : Normal Value Production Rate Local Orders → Peak Value Production Rate Local Orders
- VinculoCausal₁₆₅ : Normal Value Production Start Rate → Increase Production Start Rate

- VinculoCausal₁₆₆ : Normal Value Production Start Rate → Peak Value Production Start Rate
- VinculoCausal₁₆₇ : Normal Value Total Orders → Increase Total Orders
- VinculoCausal₁₆₈ : Normal Value Total Orders → Peak Value Total Orders
- VinculoCausal₁₆₉ : Operating Costs → Gross Profit
- VinculoCausal₁₇₀ : Peak Value Export Shipment Rate → Increase Export Shipment Rate
- VinculoCausal₁₇₁ : Peak Value Incoming Export Orders → Increase Incoming Export Orders
- VinculoCausal₁₇₂ : Peak Value Incoming Local Orders → Increase Incoming Local Orders
- VinculoCausal₁₇₃ : Peak Value Local Shipment Rate → Increase Local Shipment Rate
- VinculoCausal₁₇₄ : Peak Value Material Delivery Rate → Increase Material Delivery Rate
- VinculoCausal₁₇₅ : Peak Value Production Rate Export Orders → Increase Production Rate Export Orders
- VinculoCausal₁₇₆ : Peak Value Production Rate Local Orders → Increase Production Rate Local Orders
- VinculoCausal₁₇₇ : Peak Value Production Start Rate → Increase Production Start Rate
- VinculoCausal₁₇₈ : Peak Value Total Orders → Increase Total Orders
- VinculoCausal₁₇₉ : Processing Costs Rate → Operating Cost Rate
- VinculoCausal₁₈₀ : Processing Costs Rate → Operating Costs

- VinculoCausal₁₈₁ : Processing Costs Rate → Profit Rate
- VinculoCausal₁₈₂ : Production Capacity → Production Plan
- VinculoCausal₁₈₃ : Production Plan → Desired Material Usage Rate
- VinculoCausal₁₈₄ : Production Rate For Export Orders → Export Inventory
- VinculoCausal₁₈₅ : Production Rate For Export Orders → Normal Value Production Rate Export Orders
- VinculoCausal₁₈₆ : Production Rate For Export Orders → Peak Value Production Rate Export Orders
- VinculoCausal₁₈₇ : Production Rate For Export Orders → Production Coverage
- VinculoCausal₁₈₈ : Production Rate For Export Orders → Total Production
- VinculoCausal₁₈₉ : Production Rate For Export Orders → Work in Process Inventory
- VinculoCausal₁₉₀ : Production Rate For Local Orders → Local Inventory
- VinculoCausal₁₉₁ : Production Rate For Local Orders → Normal Value Production Rate Local Orders
- VinculoCausal₁₉₂ : Production Rate For Local Orders → Peak Value Production Rate Local Orders
- VinculoCausal₁₉₃ : Production Rate For Local Orders → Production Coverage
- VinculoCausal₁₉₄ : Production Rate For Local Orders → Total Production
- VinculoCausal₁₉₅ : Production Rate For Local Orders → Work in Process Inventory
- VinculoCausal₁₉₆ : Production Start Rate → Normal Value Production Start Rate
- VinculoCausal₁₉₇ : Production Start Rate → Peak Value Production Start Rate
- VinculoCausal₁₉₈ : Production Start Rate → Work in Process Inventory

- VinculoCausal₁₉₉ : Relation Between Desired Productions \rightarrow Production Rate For Export Orders
- VinculoCausal₂₀₀ : Relation Between Desired Productions \rightarrow Production Rate For Local Orders
- VinculoCausal₂₀₁ : Required Material Delivery Rate \rightarrow Compromised Material Delivery Rate
- VinculoCausal₂₀₂ : Revenue \rightarrow Gross Profit
- VinculoCausal₂₀₃ : Stepp \rightarrow Local Mnfg Input
- VinculoCausal₂₀₄ : Stepp \rightarrow Local SC Input
- VinculoCausal₂₀₅ : Stepp 0 \rightarrow Export Mnfg Input
- VinculoCausal₂₀₆ : Time \rightarrow Inventory Cost Rate
- VinculoCausal₂₀₇ : Time \rightarrow Materials Cost Rate
- VinculoCausal₂₀₈ : Time \rightarrow Normal Value Export Shipment Rate
- VinculoCausal₂₀₉ : Time \rightarrow Normal Value Incoming Export Orders
- VinculoCausal₂₁₀ : Time \rightarrow Normal Value Incoming Local Orders
- VinculoCausal₂₁₁ : Time \rightarrow Normal Value Local Shipment Rate
- VinculoCausal₂₁₂ : Time \rightarrow Normal Value Material Delivery Rate
- VinculoCausal₂₁₃ : Time \rightarrow Normal Value Production Rate Export Orders
- VinculoCausal₂₁₄ : Time \rightarrow Normal Value Production Rate Local Orders
- VinculoCausal₂₁₅ : Time \rightarrow Normal Value Production Start Rate
- VinculoCausal₂₁₆ : Time \rightarrow Peak Value Export Shipment Rate
- VinculoCausal₂₁₇ : Time \rightarrow Peak Value Incoming Export Orders

- VinculoCausal₂₁₈ : Time → Peak Value Incoming Local Orders
- VinculoCausal₂₁₉ : Time → Peak Value Local Shipment Rate
- VinculoCausal₂₂₀ : Time → Peak Value Material Delivery Rate
- VinculoCausal₂₂₁ : Time → Peak Value Production Rate Export Orders
- VinculoCausal₂₂₂ : Time → Peak Value Production Rate Local Orders
- VinculoCausal₂₂₃ : Time → Peak Value Production Start Rate
- VinculoCausal₂₂₄ : Time → Peak Value Total Orders
- VinculoCausal₂₂₅ : Time → Processing Costs Rate
- VinculoCausal₂₂₆ : Total Production → Processing Costs Rate
- VinculoCausal₂₂₇ : Work in Process Inventory → Adjustment for WIP
- VinculoCausal₂₂₈ : Work in Process Inventory → Maximum Production Rate
- VinculoCausal₂₂₉ : Work in Process Inventory → Production Coverage

B.3. SILS

- SILS₁ : Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast
- SILS₂ : Maximum Production Rate → Production Rate For Export Orders → Work in Process Inventory
- SILS₃ : Maximum Production Rate → Production Rate For Local Orders → Work in Process Inventory
- SILS₄ : Desired Export Shipment Rate → Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate → Export Backlog
- SILS₅ : Desired Local Shipment Rate → Local Shipment Rate → Local Fulfillment Rate → Local Backlog

- $SILS_6$: Export Inventory \rightarrow Maximum Export Shipment Rate \rightarrow Export Order Fulfillment Ratio \rightarrow Export Shipment Rate
- $SILS_7$: Local Inventory \rightarrow Maximum Local Shipment Rate \rightarrow Local Order Fulfillment Ratio \rightarrow Local Shipment Rate
- $SILS_8$: Material Usage Rate \rightarrow Materials Inventory \rightarrow Maximum Material Usage Rate \rightarrow Material Usage Ratio
- $SILS_9$: Adjustment for Material Inventory \rightarrow Desired Material Delivery Rate \rightarrow Compromised Material Delivery Rate \rightarrow Material Delivery Rate \rightarrow Materials Inventory
- $SILS_{10}$: Adjustment from Export Inventory \rightarrow Desired Export Production \rightarrow Relation Between Desired Productions \rightarrow Production Rate For Export Orders \rightarrow Export Inventory
- $SILS_{11}$: Adjustment from Local Inventory \rightarrow Desired Local Production \rightarrow Relation Between Desired Productions \rightarrow Production Rate For Local Orders \rightarrow Local Inventory
- $SILS_{12}$: Compromised Material Delivery Rate \rightarrow Material Delivery Rate \rightarrow Materials Inventory \rightarrow Maximum Material Usage Rate \rightarrow Required Material Delivery Rate
- $SILS_{13}$: Desired Export Shipment Rate \rightarrow Export Order Fulfillment Ratio \rightarrow Export Shipment Rate \rightarrow Export Fulfillment Rate \rightarrow Export Backlog
- $SILS_{14}$: Desired Local Shipment Rate \rightarrow Local Order Fulfillment Ratio \rightarrow Local Shipment Rate \rightarrow Local Fulfillment Rate \rightarrow Local Backlog
- $SILS_{15}$: Adjusted Payment Delay \rightarrow Materials Delay Time \rightarrow Material Delivery Rate \rightarrow Materials Inventory \rightarrow Adjustment for Material Inventory \rightarrow Desired Material Delivery Rate \rightarrow Compromised Material Delivery Rate

- SILS₁₆ : Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- SILS₁₇ : Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
- SILS₁₈ : Adjustment in Forecasted Material → Materials Forecast → Required Material Delivery Rate → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory → Maximum Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate
- SILS₁₉ : Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Export Inventory → Maximum Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate → Export Backlog → Desired Export Shipment Rate
- SILS₂₀ : Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Relation Between Desired Productions → Production Rate For Export Orders → Export Inventory → Maximum Export Shipment Rate → Export Order Fulfillment Ratio → Export Shipment Rate → Export Fulfillment Rate → Export Backlog → Desired Export Inventory
- SILS₂₁ : Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory → Maximum Production Rate → Production Rate For Export Orders → Export Inventory
- SILS₂₂ : Adjustment from Local Inventory → Desired Local Production → Desired WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan → Desired Material

Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials
 → Production Start Rate → Work in Process Inventory → Maximum Production
 Rate → Production Rate For Local Orders → Local Inventory

- SILS₂₃ : Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production Plan
 → Desired Material Usage Rate → Material Usage Rate → Feasible Production
 Starts from Materials → Production Start Rate → Work in Process Inventory
 → Maximum Production Rate → Production Rate For Export Orders → Export
 Inventory → Adjustment from Export Inventory → Desired Export Production →
 Desired WIP
- SILS₂₄ : Adjustment for WIP → Desired Production Start Rate → Production
 Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material Delivery Rate → Com-
 promised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials Inventory
 → Maximum Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material Usage Rate
 → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate → Work in
 Process Inventory
- SILS₂₅ : Adjustment for Material Inventory → Desired Material Delivery Rate
 → Compromised Material Delivery Rate → Material Delivery Rate → Materials
 Inventory → Maximum Material Usage Rate → Material Usage Ratio → Material
 Usage Rate → Feasible Production Starts from Materials → Production Start Rate
 → Work in Process Inventory → Adjustment for WIP → Desired Production Start
 Rate → Production Plan → Desired Material Usage Rate → Desired Material
 Inventory
- SILS₂₆ : Change in Feasted Orders → Local Forecast

APÉNDICE C

DATOS DE LA VALIDACIÓN

C.1. MODELO PREDADOR PRESA

- G_{11} : G_{11} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. $G_{11\text{pluss}}$ representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. $G_{11\text{diff}}$ es la diferencia entre G_{11} y $G_{11\text{pluss}}$.

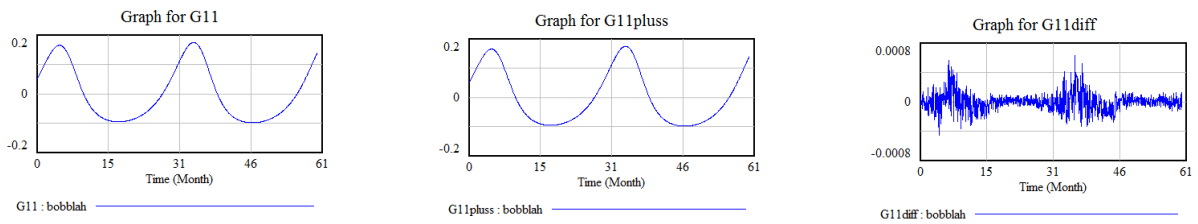


Figura C.1: Validacion G_{11}

- G_{12} : G_{12} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. $G_{12\text{pluss}}$ representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. $G_{12\text{diff}}$ es la diferencia entre G_{12} y $G_{12\text{pluss}}$.

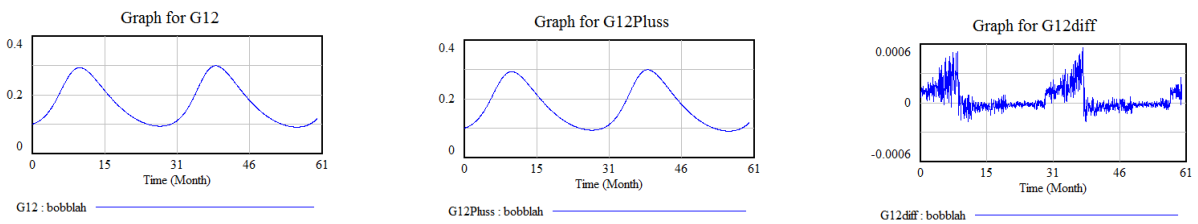


Figura C.2: Validacion G_{12}

- G_{21} : G_{21} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. $G_{21pluss}$ representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. G_{21diff} es la diferencia entre G_{21} y $G_{21pluss}$.

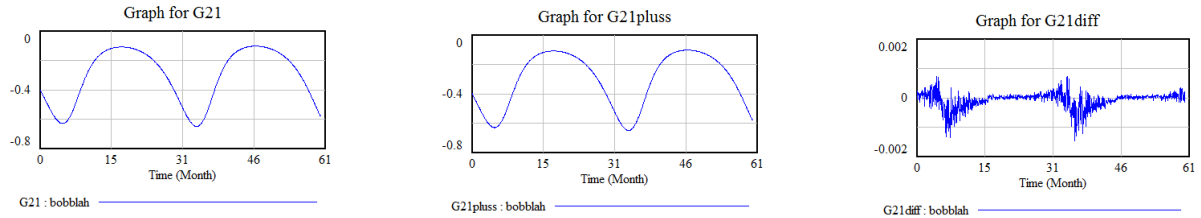


Figura C.3: Validacion G_{21}

- G_{22} : G_{22} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. $G_{22pluss}$ representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. G_{22diff} es la diferencia entre G_{22} y $G_{22pluss}$.

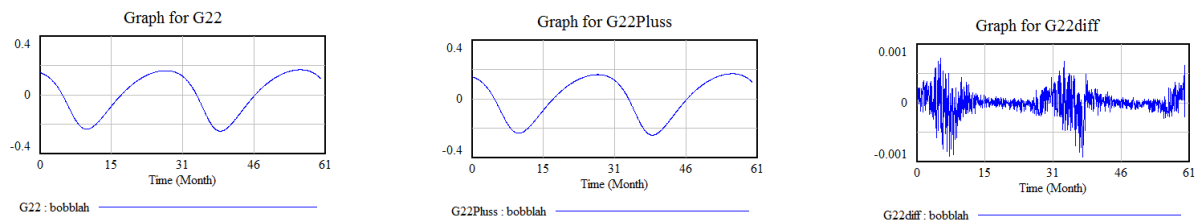


Figura C.4: Validacion G_{22}

C.2. MODELO LINEAL DE INVENTARIOS

- Los valores G_{12} , G_{13} y G_{21} y sus aproximaciones son iguales a cero (ver Paso#4 en la Sección 4.2).
- G_{11} : G_{11} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. ED_ED representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. G_{11diff} es la diferencia entre G_{11} y ED_ED .

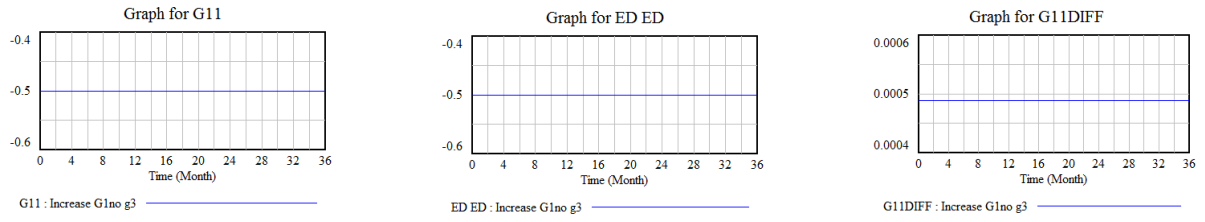


Figura C.5: Validacion G_{11}

- G_{22} : G_{22} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. I_I representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. G_{22diff} es la diferencia entre G_{22} y I_I .

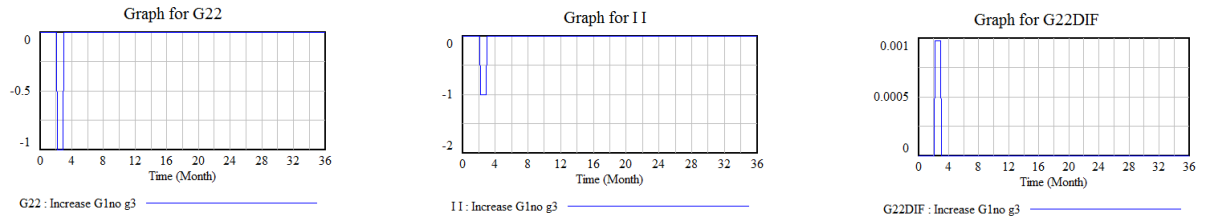


Figura C.6: Validacion G_{22}

- G_{23} : G_{23} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. G_{I_W} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. G_{23diff} es la diferencia entre G_{23} y I_W .

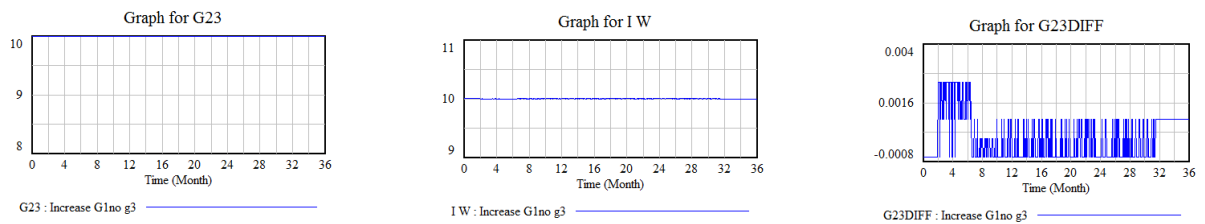


Figura C.7: Validacion G_{23}

- G_{31} : G_{31} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. W_ED representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. G_{31diff} es la diferencia entre G_{31} y W_ED .

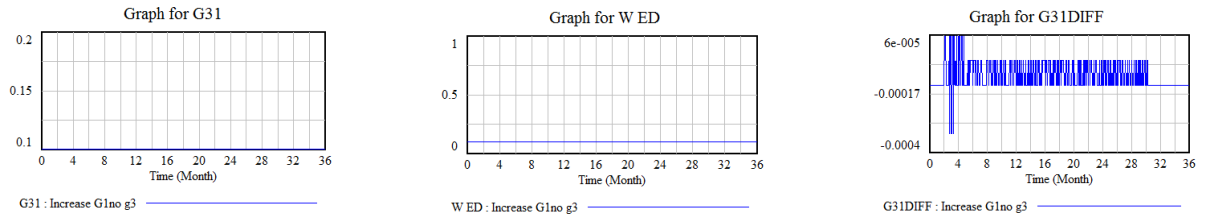


Figura C.8: Validacion G_{31}

- G_{32} : G_{32} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. W_I representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. G_{32diff} es la diferencia entre G_{32} y W_I .

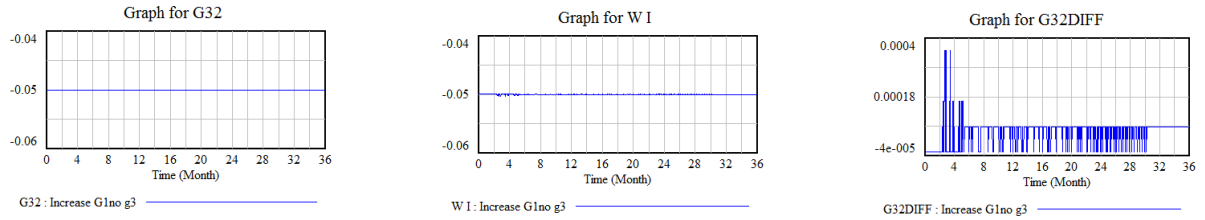


Figura C.9: Validacion G_{32}

- G_{33} : G_{33} representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de derivación matemática. W_W representa los valores de la matriz de ganancia obtenidos por medio de la aproximación numérica de la derivada. G_{33diff} es la diferencia entre G_{33} y W_W .

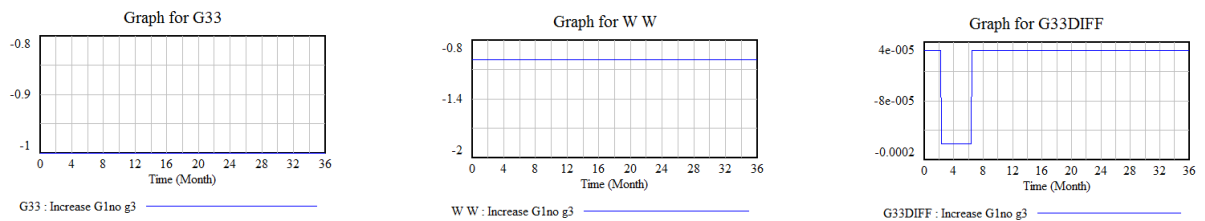


Figura C.10: Validacion G_{22}

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- Designing and Managing the Supply Chain. Richard D. Irwin, Inc., 2000.
- R.A. Amaya. A diagnostic framework for demand amplification problems in supply chains. PhD thesis, fui, 2011. URL <http://digitalcommons.fiu.edu/etd/410>.
- J. Aracil and F. Gordillo. Dinmica de Sistemas. Alianza Editorial SA., Madrid, Espaa, 1994.
- J. Forrester. Urban Dynamics. Productivity Press, 1969.
- W. Forrester, N. Mass, and C. Ryan. The system dynamics national model: Understanding socio-economic behavior and policy alternatives. Technological Forecasting and Social Change, 9(12):51 – 68, 1976. ISSN 0040-1625. doi: 10.1016/0040-1625(76)90044-5. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0040162576900445>.
- F. García. Las cadenas de suministro como un enfoque de gestin en las integraciones de procesos organizacionales. In , 2000.
- C. Gigola. Bulwhit effect. los efectos de una mala sincronización de la cadena de suministro. Reporte Tecnico ITAM, 2001.
- P. Goncalves. Eigenvalue and Eigenvectors Analysis of Dynamics Systems. , 2006.
- P. Goncalves. Behavior modes, pathways and overall trajectories: Eigenvector and eigenvalue analysis of dynamic systems. MIT Sloan Research Paper, 2008.
- B. Güneralp. Towards coherent loop dominance analysis: progress in eigenvalue elasticity analysis. System Dynamics Review, 22(3):263–289, 2006. ISSN 1099-1727. doi: 10.1002/sdr.343. URL <http://dx.doi.org/10.1002/sdr.343>.
- <http://www.daedalus.es>. Dinamica de sistemas, 2004. [Online; accessed 19-July-2004].
- C. Kampmann. Feedback loop gains and system behavior. Summarized in Proceeding of 1996 International System Dynamics Conference., 1996.

- C. Kampmann and R. Oliva. Loop eigenvalue elasticity analysis: three case studies. *System Dynamics Review*, 22(2):141–162, 2006. ISSN 1099-1727. doi: 10.1002/sdr.333. URL <http://dx.doi.org/10.1002/sdr.333>.
- O. Katime and J. Hernandez. Modelado de sistemas astronómicos con realimentación utilizando dinámica de sistemas. Observatorio Astronómico Universidad Sergio Arboleda, 2005.
- P. McCullen and D Towill. Diagnosis and reduction of bullwhip in supply chains. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2002.
- H. Moskowitz and k. Tang. Bayesian variable acceptance-sampling plans: quadratic loss function and step-loss function. *Technometrics*, 34, 1992. doi: 10.2307/1270040.
- R. Oliva. Model structure analysis through graph theory: partition heuristics and feedback structure decomposition. *System Dynamics Review*, 20(4):313–336, 2004. ISSN 1099-1727. doi: 10.1002/sdr.298. URL <http://dx.doi.org/10.1002/sdr.298>.
- M. Saleh and P. Davidsen. An Eigenvalue Approach to Feedback Loop Dominance Analysis in Non-linear Dynamic Models. , 2000.
- M. Soto. Calibracin y data screening en dinmica de sistemas como estrategia para la cuantificacin de amplificacin de demanda en cadenas de suministro. Master’s thesis, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2010.